INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2014 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MEDICINA
Inmunoterapia contra el cáncer

INGENIERÍA
Avances en el diseño flexible

MEDIOAMBIENTE
Muerte anunciada de los corales

GPS para fósiles

Nuevos modelos de información geográfica guían a los paleontólogos

SERIE - FÍSICA DE PARTÍCULAS
Las ideas que condujeron al bosón de Higgs



6,50 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

PALEONTOLOGÍA CON GPS | INMUNOTERAPIA CONTRA EL CÁNCER | ORÍGENES DEL MECANISMO DE HIGGS

N.º 454

JULIO 2014



ARTÍCULOS

GREG RUFFING







INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Tradicionalmente, los paleontólogos han confiado en gran parte en la suerte a la hora de hallar fósiles. Nuevos modelos informáticos, basados en el análisis de imágenes de satélite, ayudan a refinar la búsqueda de fósiles en áreas inexploradas. Hace poco se ha comprobado la eficacia de estas técnicas en la Gran Cuenca de la Gran Divisoria, en Wyoming. Fotografía de Wildnerdpix/ThinkStock.



redaccion@investigacionyciencia.es



Abril 2014

EL PROBLEMA DE LA GEOMETRÍA DEL PROTÓN

En el artículo «El problema del radio del protón» [por Jan C. Bernauer y Randolf Pohl; Investigación y Ciencia, abril de 2014], se describen los resultados de dos experimentos que, sin razón aparente, arrojan valores muy distintos para el tamaño del protón. ¿Podría explicarse esta discrepancia abandonando la hipótesis de la esfericidad del protón, o la de la constancia de su radio? Al igual que ocurre con los orbitales electrónicos, el protón podría presentar, según los casos, una forma lobulada o una esférica pero de radio variable.

En el texto se afirma que «el campo electrostático del muon podría deformar el protón, de un modo similar a como la Luna provoca mareas en la Tierra». Sin embargo, eso sería tanto como admitir que la interacción electromagnética puede alterar la interacción nuclear fuerte operante entre los quarks que constituyen el protón. Pero, por lo que sé, eso solo podría ocurrir a energías mucho más elevadas que las empleadas en dichos experimentos.

¿Se han realizado experimentos con núcleos más complejos, compuestos por más de un protón, cuyos resultados no sean explicables a partir del apilamiento de varios constituyentes nucleares? Me refiero a medidas de dispersión del estilo de las realizadas por Rutherford con láminas de oro.

Javier Merinero Rodríguez
Madrid

Responden Bernauer y Pohl: *Se trata de una observación interesante. De hecho, ¡sabemos que el protón no es un objeto esférico!*

Sin embargo, ambos experimentos promedian sobre todas las orientaciones posibles, por lo que el «valor cuadrático medio» del radio de carga del protón no se ve afectado por las posibles deformaciones de su geometría. El hidrógeno líquido empleado en los experimentos de dispersión no está polarizado, por lo que cada protón muestra una orientación aleatoria. Si consideramos la dispersión a un cierto ángulo, todos los sucesos provendrán de protones distintos y orientados de manera diferente, por lo que el resultado promediará sobre el «radio ecuatorial», el «radio polar», o cualquier otra geometría. De igual modo, la función de onda del muon explora toda la distribución de carga del protón, por lo que también promedia sobre todas las orientaciones. Matemáticamente, el hecho de que el momento cuadrupolar intrínseco del protón no influya sobre la transición medida en los experimentos se debe al teorema de Wigner-Eckart y al hecho de que el protón es una partícula de espín 1/2.

En cuanto al segundo comentario, la alusión a las fuerzas de marea no era más que una analogía sencilla para ayudar a visualizar el fenómeno. En realidad, esta «polarizabilidad» del protón se debe a una breve excitación virtual (por ejemplo, la resonancia delta) y su subsiguiente desexcitación. La fuerza electrostática se manifiesta en el intercambio de dos fotones virtuales. El proceso respeta la conservación de la energía y el momento, pero el principio de incertidumbre de Heisenberg permite tales excitaciones virtuales durante instantes muy breves.

Hemos de recordar que, en el interior del protón, los quarks se comportan como partículas casi libres, por lo que sí pueden sentir el efecto de la (supuestamente débil) fuerza electromagnética. La interacción nuclear fuerte solo se torna realmente intensa cuando intentamos separar los quarks. La misma clase de excitación eléctrica tiene lugar en los experimentos de dispersión elástica de electrones. El efecto parece entenderse bien y las cantidades medidas pueden corregirse para incluir el intercambio de dos fotones.

Por último, sí se han investigado las propiedades de núcleos más pesados (carbono, silicio, magnesio, etcétera) mediante experimentos de dispersión, tanto con electrones como con muones. En estos casos no se han observado diferencias significativas en los radios de carga, si bien las mediciones con muones eran mucho menos precisas, ya que no hacían uso de la técnica de espectroscopía láser. En su lugar, se observaban los fotones de fluorescencia emitidos en la desexcitación de los muones mediante espectrómetros de rayos X. A partir del desplazamiento de las líneas de esta fluorescencia muónica, puede deducirse el radio de carga del núcleo con una precisión de 10^{-3}.

No obstante, el tamaño del protón influye muy poco en el radio de carga de estos núcleos, ya que su volumen está gobernado por la interacción nucleón-nucleón. Por tanto, estos experimentos no permiten extraer ninguna conclusión sobre el radio del protón.

Hace poco, la colaboración CREMA (a la que pertenece Pohl) midió el radio muónico de los núcleos de deuterio y de helio 4 con técnicas de espectroscopía láser. Por su parte, el experimento A1, en Maguncia (del que Bernauer fue miembro durante su doctorado), ha vuelto a medir el radio de los mismos núcleos mediante dispersión de electrones. En estos momentos estamos analizando los datos a fin de determinar si la discrepancia aparece o no en estos núcleos compuestos.

Errata corrige

En el artículo **Terapia génica, segunda parte** [Investigación y Ciencia, mayo de 2014], en el antepenúltimo párrafo de la columna izquierda de la página 71 debe sustituirse «dos moléculas del sistema inmunitario que suelen presentarse juntas» por «dos moléculas del sistema inmunitario que no suelen presentarse juntas». En la columna derecha de la misma página, en el penúltimo párrafo debe figurar «1,16 millones de euros», en vez de «1,16 millones de dólares».

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LAS METANOBACTERIAS podrían haber experimentado un crecimiento explosivo merced a la actividad de los volcanes prehistóricos.

EVOLUCIÓN

Genocida microscópico

A finales del período Pérmico, hace unos 252 millones de años, la fauna comenzó a sucumbir masivamente. En apenas 20.000 años, el 90 por ciento de las especies desapareció. ¿Qué causó tamaña mortandad? Décadas de investigación no han logrado aún descubrir la razón.

La escala catastrófica de la extinción hizo que paleobiólogos y geoquímicos se inclinaran a buscar un cataclismo análogo como responsable. Se propuso el impacto de un asteroide como el que acabó con la hegemonía de los dinosaurios, pero más tarde algunos dirigieron su mirada hacia los volcanes de la Siberia actual, muy activos en aquel entonces. Las erupciones lanzaron gigantescas nubes de dióxido de carbono y metano, un fenómeno confirmado por las huellas químicas halladas en rocas de Xiakou, China. Los científicos creen que las emanaciones gaseosas calentaron el planeta y acidificaron los océanos, lo que acabó con gran parte de la vida.

Pero en esas mismas rocas, Dan Rothman, geoquímico del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), reparó en una discrepancia con la teoría del vulcanismo. Sus características químicas indican que los valores de dióxido de carbono y metano permanecieron elevados mucho tiempo. Si los gases hubieran sido el fruto de erup-

EDU LEON, GETTY IMAGES (*volcán*); SCIENCE SOURCE (*bacterias*)

ciones volcánicas, cabría esperar que su concentración disminuyera antes. Rothman y sus colaboradores creen que la pauta guarda mayor semejanza con un factor biológico, no muy diferente del crecimiento exponencial de los microbios.

El grupo de investigación señala a la bacteria metanógena *Methanosarcina* como la principal culpable de las extinciones del Pérmico en un artículo publicado el pasado abril en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

La nueva hipótesis no descarta la influencia del vulcanismo. El equipo investigador del MIT cree que las ingentes cantidades de níquel emitidas por las erupciones permitieron florecer a *Methanosarcina*. La bacteria, que habría adquirido la capacidad de producir metano por aquella época, necesita el níquel para metabolizar la materia orgánica en gas. Las corrientes oceánicas habrían esparcido el níquel por el globo y ese maná habría alimentado el crecimiento desorbitado de *Methanosarcina*.

La masiva liberación de metano elevó la temperatura del planeta y aumentó la acidez de los mares, mientras que la concentración de oxígeno se desplomó a medida que este era consumido durante la conversión natural del metano en dióxido de carbono. Los organismos comenzaron a morir y, en una espiral ascendente, *Methanosarcina* se cebó con la materia descompuesta liberando a su vez más metano.

Los hallazgos sugieren que la evolución microbiana ha influido de forma determinante en la evolución del medio. Rothman afirma: «Los microbios dominan el mundo. Nosotros nos limitamos a vivir en él».

Algunos científicos no ocultan su escepticismo ante la posibilidad de que una sola bacteria tomara semejante protagonismo en las extinciones del Pérmico. Lee Kump, geoquímico de la Universidad estatal de Pensilvania, apunta que el equipo de Rothman no ha podido demostrar con certeza lo que sucedió porque solo ha estudiado un grupo de rocas del sur de China. «Si ese fenómeno causó realmente las extinciones, por fuerza tuvo que quedar plasmado en rocas de otras regiones del globo», asegura. «Y todavía no hemos comenzado a investigarlo.»

—Carrie Arnold

THOMAS DEERINCK, SCIENCE SOURCE

MEDICINA

Alzhéimer y síndrome de Down, dos caras de la misma moneda



LA ACUMULACIÓN DE PLACAS en el cerebro es el rasgo distintivo de la enfermedad de Alzheimer.

¿Es la enfermedad de Alzheimer una forma adquirida del síndrome de Down? Cuando el neurobiólogo Huntington Potter planteó la pregunta por primera vez en 1991, los expertos no disimularon su escepticismo. Estaban comenzando a estudiar las causas de esta neuropatía que borra la memoria. Es sabido que, en torno a la cuarentena, el cerebro de la práctica totalidad de los pacientes con síndrome de Down, portadores de una copia extra del cromosoma 21, está repleto del péptido amiloide beta, componente de las placas que enmarañan las neuronas y que constituye el rasgo distintivo del alzhéimer. También se sabe que el gen que codifica dicha proteína está alojado en el cromosoma 21, lo que lleva a pensar que acumulan más placas porque producen una dosis adicional del péptido. Potter, empero, sugirió que si las personas con síndrome de Down sufren alzhéimer a causa del cromosoma 21 de más, las personas sanas podrían contraerla por idéntico motivo. Veinticinco años después, cada vez más indicios avalan la idea.

«Lo que especulamos en los años noventa y se está empezando a comprobar es que los enfermos de alzhéimer comienzan a sufrir errores moleculares y engendran células con tres copias del cromosoma 21», explica Potter, que en tiempo reciente ha sido nombrado director de investigación de la enfermedad de Alzheimer en la facultad de medicina de la Universidad de Colorado, con el fin expreso de estudiar esta neuropatía bajo el prisma del síndrome de Down.

Ya no es el único que estudia el vínculo. En los últimos años, docenas de estudios han demostrado que los pacientes con alzhéimer poseen un número desproporcionado de células similares a las del síndrome de Down. Un estudio ruso de 2009 comprobó que hasta el 15 por ciento de las neuronas de los afectados contiene una copia supernumeraria del cromosoma 21. Otros han demostrado que presentan entre 1,5 y dos veces más células cutáneas y sanguíneas portadoras de esa copia que los individuos de control sanos. Los estudios emprendidos por Potter en ratones parecen revelar un círculo vicioso: la exposición de las células normales al amiloide beta tiende a provocar errores durante la división y a aumentar el número de células con trisomía 21, que producen más placa. Potter y su equipo publicaron en febrero un artículo en línea en *Neurobiology of Aging* que explicaba el posible origen de esos errores: la inhibición de una enzima.

Entretanto, durante los últimos cinco años investigadores de la Universidad de Kentucky han recopilado neuroimágenes, análisis sanguíneos y encuestas de hábitos de vida de docenas de adultos con síndrome de Down. Pretenden averiguar por qué solo entre el 60 y el 80 por ciento de ellos acabará padeciendo demencia, aunque la práctica totalidad acumulará placas en el cerebro.

El director de la red de Institutos Nacionales de Salud de EE.UU., Francis Collins, declaró hace poco ante un subcomité del Senado que existe un «vivo interés» por estudiar conjuntamente las dos enfermedades. Y en 2013 la Asociación de Alzhéimer de ese país se coligó con el Instituto Linda Crnic del Síndrome de Down para financiar investigaciones que examinen el vínculo.

El estudio del alzhéimer en un colectivo relativamente pequeño que a buen seguro lo manifestará quizá permita avanzar más rápido, aclara Dean Hartley, director de iniciativas científicas de la Asociación de Alzhéimer. Él, como otros, afirma que es precipitado concluir que esta demencia constituya una variante del síndrome de Down: «Pero necesitamos nuevas ideas como esta para entender mejor los mecanismos ocultos de la enfermedad».

—Lisa Marshall

BIOLOGÍA

El cromosoma sexual masculino no se está encogiendo

El cromosoma Y es el más corto de los 46 cromosomas humanos. A pesar de su consabida función (la determinación del sexo masculino en los mamíferos) parece insignificante ante sus hermanos, especialmente ante su pareja, el cromosoma X. Hace 200 o 300 millones de años ambos presentaban unos 600 genes comunes. Hoy solo comparten 19. Semejante pérdida, señalada por algunos genetistas en 2002, indicaría que el cromosoma Y se está atrofiando. Dentro de diez millones de años se habrá extinguido, aseguraban. Otros se preguntaron si los hombres desaparecerían con él.

Pero según un nuevo estudio, el cromosoma Y ha dejado de perder genes y, de hecho, ha permanecido entero durante los últimos 25 millones de años, sostiene David Page, biólogo del Instituto de Tecnología de Massachusetts y coautor del trabajo, publicado en *Nature*. El equipo de Page constató que, a pesar de que Y es más corto en especies más recientes, el desgaste se frenó hace algunos millones de años.

Esa estabilidad provendría de una docena de genes sin relación con el sexo pero responsables de funciones vitales en células cardíacas, sanguíneas, pulmonares y de otros tejidos. Ocupan un puesto esencial en el centro de mando de la célula y la selección natural favorece su perpetuación, asegura Page.

Una partidaria de la hipótesis de la reducción de Y no está convencida. Jennifer Graves, genetista de la Universidad Nacional de Australia, opina que los últimos millones de años podrían representar solo una pausa. Al menos dos grupos de roedores ya se las apañan bien sin él. La nueva investigación indica, sin embargo, que conservará su talla y a duras penas encogerá.

—Josh Fischman





FULMARES en las islas Orcadas, Escocia

ECOLOGÍA

El censo de las aves

El recuento de aves y nidos constituye una de las técnicas de campo básicas de la ornitología. Pero hay una gran diferencia entre contar pájaros en un jardín suburbano y divisar aves marinas. Estas, cuya situación refleja el estado de los ecosistemas donde habitan, suelen anidar en lugares inaccesibles, encajonados en acantilados o en islas remotas azotadas por oleajes embravecidos. Muchas depositan la puesta en el fondo de huras y madrigueras de más de un metro de profundidad para resguardar los huevos de los elementos. Y por si todo eso no bastara, la mayoría tiene hábitos nocturnos, lo que dificulta la mera observación.

«Hay un gran número de colonias de pardelas y petreles de las que no tenemos ni idea si están compuestas por cientos, miles o decenas de miles de parejas», confiesa Steffen Oppel, de la Real Sociedad para la Protección de las Aves. Para monitorizar las poblaciones que no pueden observar, él y sus colaboradores han ideado un ingenioso método, el cual consiste en escuchar.

El equipo ha comprobado que es posible calcular el tamaño de las poblaciones a partir de registros sonoros, un método que pusieron a prueba en una estridente colonia de pardelas cenicientas situada en un islote de las Azores llamado Corvo. Hace poco han presentado los resultados en *Nature Conservation*. Al combinar los datos acústicos aportados por nueve micrófonos repartidos por el islote con la información sobre la densidad de los nidos, elaboraron un algoritmo que toma los teraoctetos de registros sonoros y recuenta automáticamente el número de reclamos individuales. Como era lógico, comprobaron que cuantos más nidos había, mayor estridencia y más reclamos se recogían en la grabación. La correlación les permitió inferir un censo aproximado de las aves de la isla: unas 6000 parejas reproductoras, una cifra que hasta entonces había sido mera conjetura.

Aunque el cálculo pueda estar un tanto errado, el método de Oppel resultará útil para el estudio de las fluctuaciones demográficas a lo largo del tiempo. Con ello se podrá deducir el estado de salud de las cadenas tróficas de la avifauna marina y observar la evolución de las colonias de cría ante peligros tales como los depredadores introducidos y el cambio climático.

—Jason G. Goldman

THOMAS FUCHS (*cromosomas*); GETTY IMAGES (*islas Orcadas*)

ASTRONOMÍA

¿Ha nacido una luna en los anillos de Saturno?

Saturno, tan conocido por sus asombrosos anillos, cuenta también con nada menos que 62 satélites naturales: del gigantesco Titán, mayor que Mercurio, a uno del tamaño del *Titanic*. Ahora, puede que los astrónomos estén asistiendo a algo que nunca antes habían visto: el nacimiento de una nueva luna en los mismos anillos que hacen de Saturno un espectáculo incomparable.

«Fue un descubrimiento accidental», explica Carl Murray, planetólogo de la Universidad Queen Mary de Londres. En abril de 2013, mientras examinaba nuevas imágenes de las lunas de Saturno tomadas por la sonda *Cassini*, observó una mancha brillante de más de mil kilómetros de largo en el borde del anillo A, el más externo de los tres principales que posee el planeta.

Según conjeturan Murray y sus colaboradores en el número del 1 de julio de la revista *Icarus*, esa mancha podría señalar la presencia de una nueva luna que pugna por nacer. El incipiente satélite no mediría ni un kilómetro de ancho: demasiado pequeño para verlo, hasta que el año pasado algo lo golpeó y produjo el destello que llamó la atención de Murray. El anillo A parece propicio para gestar nuevas lunas, ya que la influencia gravitatoria de Jano, un satélite de buen tamaño situado más allá del anillo, hace que las partículas del borde exterior se aglomeren. Si forman un cúmulo lo bastante grande, su propia gravedad atraerá más material y conformará un nuevo satélite. Murray cree que este, en concreto, se habría formado hace poco, si bien desconoce si puede tratarse de pocos años o de millones de ellos.

Jeff Cuzzi, investigador del Centro de Investigación Ames de la NASA que no participó en el descubrimiento, alberga pocas dudas de que Murray haya encontrado una luna naciente. Lo más importante ahora, explica, es el destino del nuevo objeto: ¿logrará escapar de los anillos para ocupar un lugar entre las lunas ya establecidas o acabará desintegrándose? El satélite en ciernes aún habrá de superar dificultades. Cabe presumir que se compone de hielo de agua, como los anillos de Saturno, por lo que los impactos de los meteoroides podrían pulverizarlo en unos millones de años.



UNA MANCHA BRILLANTE en los anillos de Saturno quizá señale la presencia de una nueva luna.

Murray espera verlo directamente en 2016, cuando *Cassini* pase lo bastante cerca del anillo A para fotografiarlo. Los anillos de Saturno son planos y giran alrededor de un objeto de gran masa, por lo que en ese sentido se asemejan al disco protoplanetario de una estrella joven. Por tanto, la gestación de la nueva luna podría ayudar a entender mejor los mecanismos de formación planetaria. El bello planeta nos ofrecería así un microcosmos imitador de sistemas solares recién nacidos.

—Ken Croswell

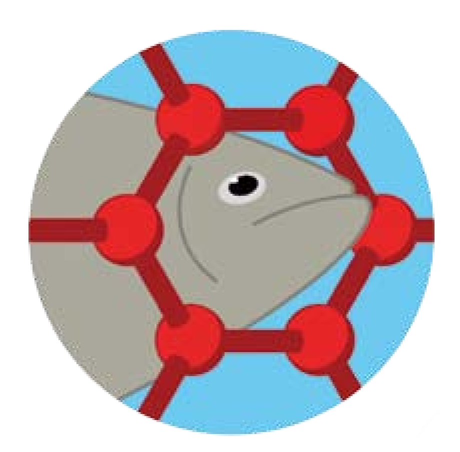
MEDIOAMBIENTE

El lado oscuro del grafeno

El grafeno, nanomaterial famoso, se encuentra formado por láminas de carbono de un solo átomo de espesor. Además de ser el material más resistente que jamás se haya puesto a prueba, abunda en propiedades electrónicas superlativas. Tras una década de investigaciones, falta poco para que pase del laboratorio a las aplicaciones comerciales, entre las que podría destacar como componente de aviones ultraligeros o en baterías de gran capacidad.

Así pues, tal vez haya llegado el momento oportuno de adelantarse a sus posibles riesgos, antes de que los trabajadores queden expuestos al grafeno o de que este llegue al agua potable, explica Sharon Walker, ingeniera ambiental de la Universidad de California en Riverside. En una investigación publicada hace poco en *Environmental Engineering Science*, su grupo estudió el comportamiento del óxido de grafeno en el agua.

Los investigadores observaron que, en una solución que imitaba las aguas subterráneas, el material se apelotonaba y se hundía, por lo que no parecía entrañar riesgos. Sin embargo, no ocurría lo mismo en una solución que imitaba el agua superficial, como la de los lagos y los depósitos de agua potable. En tales circunstancias no se depositaba en el fondo, sino que flotaba y se adhería a la materia orgánica generada por la descomposición de plantas y animales. Esa movilidad podría incrementar las posibilidades de que animales y personas ingiriesen óxido de grafeno, cuya toxicidad ha quedado demostrada en estudios anteriores con ratones y células pulmonares humanas.

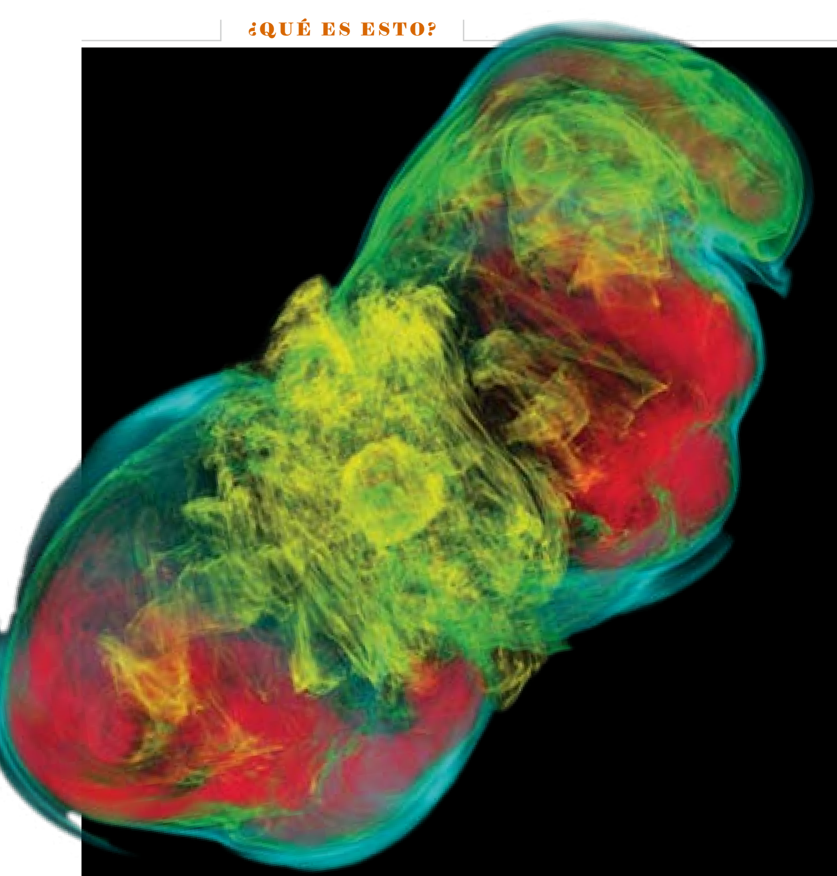


Si tales materiales fuesen peligrosos para la salud humana, su movilidad en las aguas superficiales supondría un grave problema. Walker espera que estos estudios lleguen a tiempo para ser considerados en el desarrollo industrial del grafeno y sus derivados, así como para su regulación por parte organismos públicos, como la Agencia de Protección Ambiental estadounidense.

—Katherine Bourzac

CORTESÍA DE NASA/JPL-CALTECH/INSTITUTO DE CIENCIA ESPACIAL (*Saturno*); THOMAS FUCHS (*grafeno*)

¿QUÉ ES ESTO?

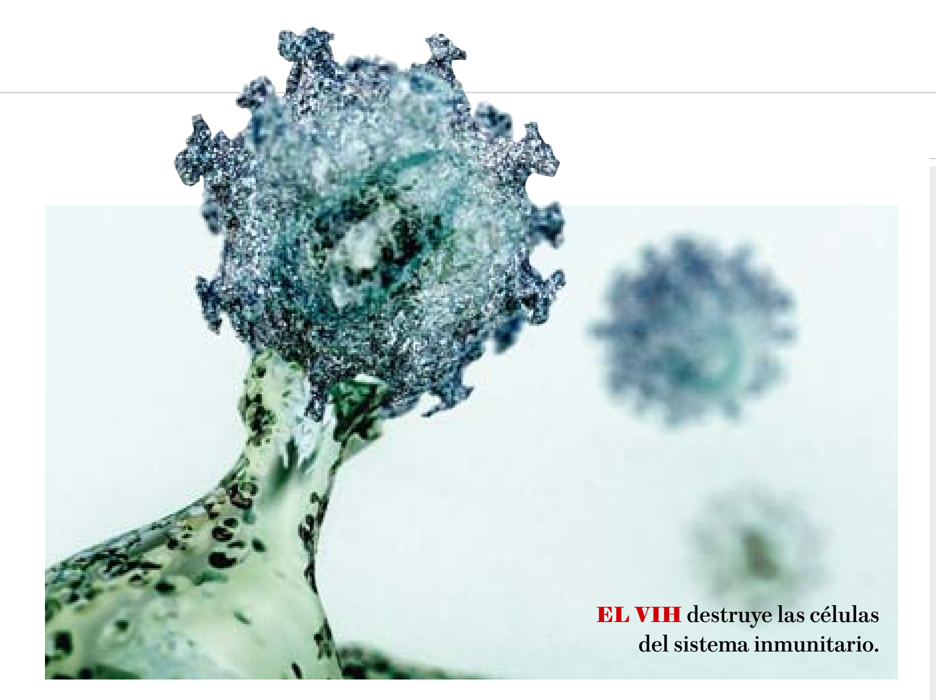


Aunque parezca una pompa de jabón, la imagen muestra la simulación tridimensional de una supernova. O, más bien, de un intento fallido de supernova. Pocos fenómenos hay en el cosmos que desprendan más energía que las violentas explosiones que ponen fin a la muerte de las estrellas muy masivas. Sin embargo, no se trata de un todo o nada: tal y como muestra una nueva simulación por ordenador descrita hace poco en *Astrophysical Journal Letters*, hay supernovas que se detienen antes de haberse desencadenado por completo.

El programa simuló cierta clase de supernovas que se producen en estrellas de rápida rotación y muy magnetizadas. Para sorpresa de los investigadores, el proceso puede llegar a detenerse con facilidad: si el campo magnético que rodea a la estrella no es perfectamente simétrico, las pequeñas irregularidades pueden llegar a convertirse en grandes inestabilidades, que harán que la materia estelar brote hacia el exterior y cree los bulbos desiguales que se ven aquí. El fenómeno impide que la estrella estalle como una supernova típica. Para saber en qué acaban estas explosiones abortadas, el grupo de científicos, dirigido por Philipp Mösta y Christian Ott, explica que deberán extender la simulación con un superordenador más potente.

—*Clara Moskowitz*

CORTESÍA DE PHILIPP MÖSTA Y SHERWOOD RICHERS, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA (*simulación 3-D*)



EL VIH destruye las células del sistema inmunitario.

MEDICINA

La próxima generación de fármacos contra el VIH

Los médicos consideran que la infección por el VIH ha dejado de ser una sentencia de muerte para convertirse en una enfermedad crónica gracias al éxito de los medicamentos antirretrovíricos (ARV), que retrasan en gran medida la aparición del sida. Con esa gran baza en la mano, la prioridad se centra ahora en la prevención. Las opciones disponibles para la mayoría de la humanidad (abstinencia, condón y circuncisión masculina) resultan insuficientes: cada día más de 6000 personas contraen el VIH. Y dichos métodos son especialmente problemáticos para las mujeres, que debido a las circunstancias económicas y sociales tienen menos poder de decisión.

Como alternativa para la población femenina, los científicos están ensayando una nueva clase de antirretrovíricos, los microbiocidas, que evitan de raíz la infección por el VIH. Han adaptado estas sustancias a diversos dispositivos que se están examinando en ensayos clínicos. Robert Grant, experto en sida de la Universidad de California en San Francisco, asegura que los productos están ofreciendo excelentes resultados preliminares. «Creo sinceramente que podremos ganarle la batalla al VIH, pero hemos estado persiguiendo durante demasiado tiempo el santo grial, un único producto para prevenir la infección. Y no existe un remedio universal.» A continuación, presentamos tres microbiocidas en desarrollo.

—*Annie Sneed*

Anillo vaginal

Insertado en la vagina, este anillo de silicona desprende dapivirina por espacio de un mes. Se trata de un antirretrovírico, en concreto, un inhibidor de la transcriptasa inversa. Bloquea la replicación del ARN vírico en ADN, con lo que evita que el virus se apropie de la célula. Más de 5000 mujeres africanas lo están utilizando en dos ensayos clínicos de fase III que concluirán en 2016. Si se demuestra su seguridad y eficacia, podría servir como un dos en uno. Se está desarrollando un anillo con dapivirina y un anticonceptivo que impediría tanto la infección del VIH como el embarazo.

Gel precoital

El gel de tenofovir, otro inhibidor de la transcriptasa inversa, se incorpora a un aplicador semejante a un tampón que se coloca antes y después del coito. El gel transparente fue el primer microbiocida que redujo de manera notable la infección por el VIH en un ensayo clínico importante en el que participaron cerca de 900 mujeres. Evitó la infección en el 54 por ciento de las mujeres que lo emplearon con regularidad. Actualmente se sigue evaluando en nueve centros de Sudáfrica. Los resultados se esperan para finales de 2014.

Gel poscoital

El gel de raltegravir tal vez consiga algún día lo que los otros dos no pueden hacer: ofrecer protección contra el VIH después del coito. Raltegravir actúa en una de las últimas etapas del ciclo biológico del virus, antes de su integración en el cromosoma humano. Los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU. estudiaron en marzo el gel en macacos y comprobaron su elevada eficacia en la prevención de la infección hasta tres horas después de la exposición al patógeno. Si acaba superando los ensayos clínicos y se convierte en una realidad, podrá ser de gran ayuda, sobre todo en casos de violación.

SCIENCE SOURCE (*VIH*); PARQUE DE LAS CIENCIAS (*exposición*)

AGENDA

CONFERENCIAS

10 de julio
La física nuclear y su impacto social
Ciclo «Los secretos de las partículas. La física fundamental en la vida cotidiana»
María José G. Borge, CERN
Palacio del Marqués de Salamanca
Madrid
www.fbbva.es > agenda

18 de julio
Investigación para la sostenibilidad global
Gordon McBean, Universidad de Ontario Occidental e IPCC
26.º Congreso Anual de la Academia Europea
Cosmocaixa, Barcelona
www.ae2014barcelona.com

EXPOSICIONES

Sanidad militar española. Historia y aportaciones a la ciencia
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com



OTROS

Del 2 al 9 de Julio
37.ª Conferencia internacional sobre física de altas energías
Palacio de Congresos, Valencia
ichep2014.es

3 de Julio – Debate
Neurociencia y derecho
Mercè Boada, Fundación ACE
David Felip Saborit, Universidad Pompeu Fabra
Fermín Morales Prats, gabinete jurídico Fermín Morales
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
www.crg.eu/events

Del 14 al 18 de julio – Curso
Quiero ser divulgador: Aprendiendo a difundir tu conocimiento
Universidad de Barcelona
www.ub.edu/juliols

Del 14 al 18 de julio – Curso
Viaje al núcleo de la ciencia del siglo xxi
Facultad de Ciencias
Universidad de Gerona
www.fundacioudg.org

ASTROFÍSICA

Las supernovas y el misterioso origen de los rayos cósmicos

Observaciones pioneras de los restos de una supernova milenaria revelan aspectos clave sobre el origen de los rayos cósmicos

JESÚS FALCÓN BARROSO, SLADJANA NIKOLIĆ Y GLENN VAN DE VEN

Los rayos cósmicos son partículas (típicamente protones) procedentes de fuera de nuestro sistema solar que viajan por el universo a velocidades próximas a la de la luz. Se calcula que cada segundo chocan contra la atmósfera terrestre unos mil rayos cósmicos por metro cuadrado. Al impactar, provocan reacciones que generan una cascada de partículas de menor energía, por lo que no resulta sencillo deducir la fuente de emisión del rayo original.

El origen de los rayos cósmicos suele relacionarse con los remanentes de supernovas (las violentas explosiones que ponen fin a la vida de las estrellas muy masivas). Los análisis teóricos sugieren que en ellos podrían existir regiones donde los protones, al interaccionar con el medio interestelar expulsado por la supernova, adquirirían energía suficiente para producir rayos cósmicos. Sin embargo, dicho vínculo no se había observado hasta hace poco.

La detección de rayos cósmicos constituye una ardua tarea. Esta se basa, fundamentalmente, en medir una serie de partículas (piones neutros y rayos gamma) resultantes de la interacción entre los protones acelerados y el medio interestelar que los rodea.

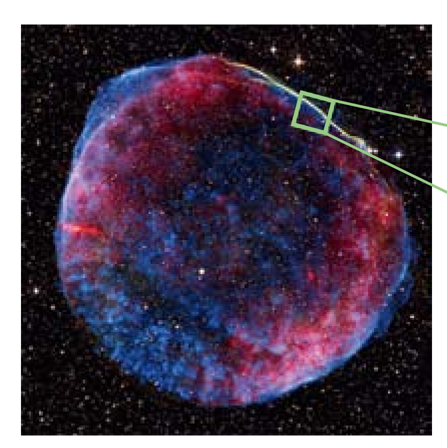
En 2013, tras cuatro años de investigación, Markus Ackermann, del centro de investigación alemán DESY, y su red internacional de colaboradores lograron la primera detección de dichas partículas en los remanentes de las supernovas IC443 y W44. Los datos de este hallazgo se obtuvieron con el instrumento LAT del telescopio espacial de rayos gamma Fermi. Su estudio, publicado en la revista *Science* en febrero del mismo año, confirmó el papel que desempeñan las supernovas en la generación de los rayos cósmicos. Sin embargo, la instrumentación utilizada no permitía localizar con precisión en qué zona del remanente se habían originado los rayos cósmicos.

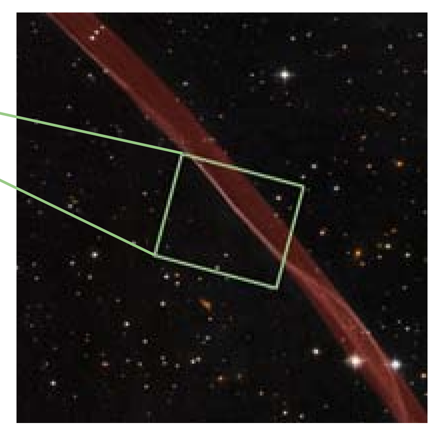
Supernovas en 3D

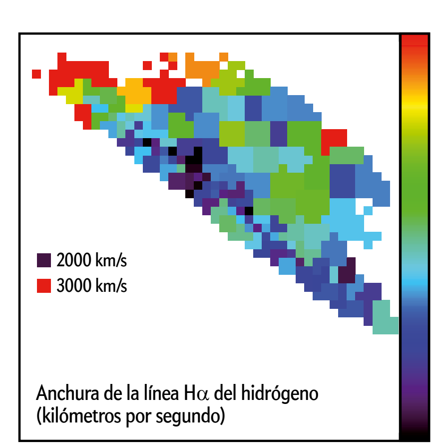
Al mismo tiempo, y de forma independiente, el estudio liderado por una de las autoras de este artículo (Nikolić) llegó a la misma conclusión a partir de las observaciones del remanente de SN1006, una supernova cuya luz alcanzó nuestro planeta en el año 1006. El trabajo, publicado en la misma edición de la revista *Science*, hizo uso de una nueva técnica instrumental, gracias a la cual pudimos localizar con exactitud las regiones del objeto originarias de los rayos cósmicos.

Nuestro equipo empleó el dispositivo VIMOS, un espectrógrafo de campo integral instalado en uno de los telescopios del Observatorio Paranal, en Chile, perteneciente al Observatorio Europeo Austral. La novedad principal de este tipo de instrumento reside en que permite generar imágenes en distintas longitudes de onda, de modo que la luz registrada en cada punto de la imagen se separa individualmente en los colores que la componen, lo que da lugar a un «cubo de datos» con dos dimensiones espaciales y una espectral.

Tales instrumentos suelen utilizarse para estudiar la dinámica de las galaxias y sus poblaciones estelares. Sin embargo, en nuestro trabajo lo empleamos para estudiar una región muy concreta del remanente de SN1006. En ello residió, precisamente, la originalidad de nuestro trabajo.







ACELERADORES CÓSMICOS: El remanente de la supernova SN1006 (*izquierda*), situado a 7200 años luz de nuestro planeta, ha contribuido a esclarecer el origen de los rayos cósmicos. Al analizar una región de su frente de choque (la frontera entre el material eyectado por la supernova y el medio interestelar, *centro*), un equipo internacional ha obtenido un mapa espectral de la línea Hα del hidrógeno en dicha zona (*derecha*). El amplio abanico de valores en el ensanchamiento de la línea (*colores*) revela la existencia de protones acelerados a muy altas velocidades, una condición previa a la generación de rayos cósmicos.

NRAO/AUI/NSF/GBT/VLA/DYER, MADDALENA&CORNWELL (*remanente de SN1006 en ondas de radio*); CHANDRA X-RAY OBSERVATORY, NASA/CXC/RUTGERS/G. CASSAM-CHENAÏ, J. HUGHES ET AL. (*SN1006, rayos X*); 0,9 M CURTIS SCHMIDT TELESCOPE, NOAO/AURA/NSF/CTIO/MIDDLEBURYCOLLEGE/F. WINKLER AND DIGITIZED SKY SURVEY (*SN1006, luz visible*); NASA/ESA HUBBLE SPACE TELESCOPE (*detalle del frente de choque*); J. FALCÓN BARROSO, S. NIKOLIĆ, G. VAN DE VEN (*mapa espectral*)

La nueva técnica nos permitió entender las propiedades dinámicas y la composición del material eyectado por la supernova. Al impactar con la materia interestelar estacionaria circundante, dicho material genera un frente de choque. Dicho fenómeno resulta similar a la explosión sónica producida por los aviones a reacción, por lo que cabe esperar que en tales regiones las partículas adquieran energías muy elevadas.

Nuestro estudio sugiere que, inmersa en el gas que forma el frente de choque, existe una población considerable de protones que se desplazan a muy altas velocidades (denominados protones supratérmicos, ya que se mueven más rápido de lo que cabría esperar a partir de la temperatura circundante). Al interaccionar con el medio, esos protones pueden alcanzar la energía necesaria para saltar al espacio en forma de rayos cósmicos. Este resultado se deduce del análisis de la intensidad relativa y del grado de ensanchamiento de la línea espectral Hα del hidrógeno en distintas zonas del frente de choque.

El estudio tridimensional de las condiciones de estos protones a lo largo del frente de choque ha permitido resolver, finalmente, el misterioso origen de los rayos cósmicos y su relación con las supernovas. El empleo de esta nueva técnica para detectar la presencia de protones en el remanente de la supernova SN1006, situado a 7200 años luz de la Tierra, abre las puertas a llevar a cabo estudios similares en otras fuentes lejanas de alta energía.

—Jesús Falcón Barroso
Instituto de Astrofísica de Canarias
—Sladjana Nikolić y Glenn van de Ven
Instituto Max Planck de Astronomía
Heidelberg

PARA SABER MÁS

An integral view of fast shocks around supernova 1006. Sladjana Nikolić et al. en *Science*, vol. 340, abril de 2013.

BIOLOGÍA MOLECULAR

Aportaciones de la cristalografía a la medicina

De la comprensión de las armas moleculares de los patógenos al desarrollo de fármacos contra enfermedades infecciosas

JUAN A. HERMOSO

Tras el inesperado hallazgo de los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen a finales del siglo XIX, otro científico, Max von Laue, descubrió en 1912 que la interacción de esa extraña radiación con un cristal daba lugar a un patrón único. Ese patrón de difracción permitía, como vieron casi de inmediato William H. Bragg y su hijo William L. Bragg, la configuración espacial de los átomos o moléculas que componían el cristal [*véase* «El nacimiento de la cristalografía de rayos X», por John Meurig Thomas; Investigación y Ciencia, junio de 2013]. Comenzaba así la cristalografía estructural que revolucionaría en pocos años muchas ramas de la ciencia, como la física y química de la materia condensada, la biología y la biomedicina. Max von Laue recibió el premio Nobel en 1914 por ese hallazgo.

Cien años después, las Naciones Unidas han declarado el 2014 Año Internacional de la Cristalografía, con el propósito de reconocer el desarrollo imparable de esta disciplina, que ha resultado fundamental para el conocimiento de la estructura tanto de la materia inerte como de la materia viva. Buena prueba de su importancia la ofrece el hecho de que 29 investigadores han sido galardonados con el nóbel por sus trabajos en cristalografía; una larga lista que aumenta cada año y que demuestra la vitalidad de esta ciencia.

Penicilina: estructura y mecanismo de acción

En la lucha contra las enfermedades infecciosas causadas por virus y bacterias, la cristalografía ha sido, y sigue siendo, un aliado fundamental. El descubrimiento de la penicilina y su poder bactericida abrieron, por primera vez en la historia de la humanidad, el camino al control de las infecciones. Pero los intentos de Fleming para purificar y estabilizar la penicilina fracasaron. En julio de 1943, un grupo de químicos descubrieron por fin el ingrediente activo de la penicilina, una pequeña molécula de 27 átomos: 11 hidrógenos, 9 carbonos, 4 oxígenos, 2 nitrógenos y 1 azufre. Sin embargo, varias estructuras presentaban esa composición: ¿se trataba de la tiazolidin-oxazolona (un grupo de dos anillos de 5 átomos) o de la beta-lactama (un anillo de cuatro átomos fusionado con otro anillo de cinco)? La solución vendría de los estudios de cristalografía de rayos X.

Los primeros cristales de penicilina producidos por una empresa farmacéutica estadounidense fueron entregados a una joven cristalógrafa de la Universidad de Oxford, Dorothy C. Hodgkin, en otoño de 1943. Su genialidad, unida a una enorme tenacidad, permitió que en 1945, a pesar de la precariedad de las técnicas de aquel entonces —y mientras la gente en las calles celebraba el fin de la guerra en Europa—, Hodgkin llevara en sus manos un modelo de alambres y corchos que representaba, por fin, la estructura de la penicilina: una beta-lactama. Esta fue la primera estructura de una molécula completa obtenida por cristalografía y abrió el camino al desarrollo de derivados semisintéticos de la penicilina (como la cefalosporina) y, por tanto, al uso generalizado de los antibióticos [*véase* «Antibióticos beta-lactámicos», por E. P. Abraham; Investigación y Ciencia, agosto de 1981]. La contribución de Hodgkin en cristalografía no se limitó a la penicilina; vinieron después la insulina, la vitamina B12 y otras muchas moléculas de interés biomédico, lo

que mereció su distinción con el premio Nobel de química en 1964.

Hubieron de transcurrir diez años para que la cristalografía diera el salto a las macromoléculas biológicas. En 1953, el estudio mediante difracción de rayos X de las fibras de ADN, obtenido por Rosalind Franklin, permitió a Watson y Crick construir su famoso modelo de la doble hélice, que hizo posible la comprensión de la herencia.

En 1958 se obtuvo la primera estructura tridimensional de una proteína, la mioglobina (1261 átomos). Este hallazgo, junto con la determinación de la hemoglobina, dos años después, marcó el nacimiento de la biología estructural. A partir de ese momento, la cristalografía no ha encontrado límites en el tamaño de las macromoléculas.

El estudio estructural de distintas proteínas bacterianas ha permitido ahondar en el mecanismo molecular de la actividad bacteriolítica de la penicilina. Las bacterias presentan una membrana lipídica y una pared celular formada por cadenas de azúcares y péptidos (peptidoglicano) que resulta crítica para mantener su integridad. Durante la síntesis de la pared, estas cadenas deben enlazarse entre sí; de ello se encargan unas enzimas responsables de la unión entre cadenas peptídicas (transpeptidasas) y otras que unen las cadenas de azucares (transglicosilasas). Los rayos X han mostrado que la penicilina (y otros antibióticos derivados) se une al sitio activo de las transpeptidasas, bloqueándolas. Esta inhibición debilita la membrana de lípidos, que termina por romperse, lo que provoca la muerte del patógeno.

La resistencia a los antibióticos

La introducción clínica de los antibióticos supuso una revolución social, hasta el punto que en los años sesenta se pensaba que las enfermedades bacterianas se erradicarían. «Escribir sobre enfermedades infecciosas es casi escribir de algo que ha pasado a la historia», comentaba el nóbel de 1960 Frank MacFarlane Burnet. Los científicos no tardaron en darse cuenta de que la situación era mucho más compleja y no tan halagüeña.

El uso —y abuso— de los antibióticos ha provocado la aparición de poblaciones de bacterias resistentes, inmunes a los efectos de los antibióticos. La situación de la resistencia bacteriana es hoy en día muy preocupante. La Organización Mundial de la Salud advierte en su informe *Antimicrobial resistance: Global report on surveillance 2014* de la amenaza de este problema: un altísimo porcentaje de las infecciones adquiridas en hospitales están causadas por bacterias altamente resistentes tales como *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM) o bacterias Gram-negativas multirresistentes. En infecciones graves tratadas en hospitales, la mortalidad debida a bacterias resistentes es el doble de la asociada a bacterias no resistentes. Ello podría suponer la vuelta a la era preantibiótica. De hecho, numerosas enfermedades infecciosas están resultando ahora intratables, incluso con los nuevos antibióticos, y la multirresistencia amenaza seriamente los Objetivos de Desarrollo del Milenio relacionados con la salud planteados por las Naciones Unidas para 2015.

¿Qué ha aportado la cristalografía a la resolución de este problema? Las bacterias presentan numerosos mecanismos de resistencia: pueden bloquear el acceso del antibiótico, destruirlo, impedir que actúe o expulsarlo de la célula. Los rayos X han arrojado luz sobre estos procesos.

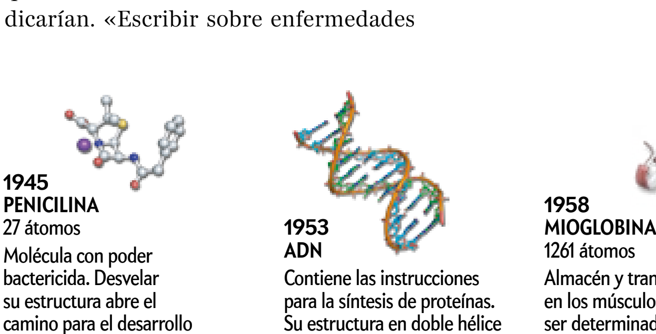
Se ha determinado la estructura de buena parte de las proteínas implicadas en la resistencia, como las β-lactamasas, así como de los inhibidores de estas biomoléculas, como el ácido clavulánico. Conocer la estructura del complejo que forman ambas moléculas (proteína e inhibidor) ha permitido ahondar en el mecanismo de acción de la droga, lo que ha facilitado el desarrollo de otros inhibidores más eficaces que el clavulánico.

Asimismo, cada vez se comprende mejor el mecanismo de expulsión del antibiótico. En un trabajo reciente, publicado el pasado mes de abril en la edición en línea de *Nature*, Dijun Du, de la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores describieron la bomba de expulsión completa. Su modelo define la organización de los componentes, las interacciones clave entre dominios y un mecanismo para la apertura del canal. Una buena base para la comprensión de la resistencia en numerosos patógenos bacterianos.

El talón de Aquiles del SARM

Las bacterias están demostrando una capacidad asombrosa para desarrollar nuevos mecanismos de resistencia. Se ha visto que el patógeno multirresistente SARM incorporó un gen de otra bacteria —hoy por hoy desconocida— que codificaba una proteína llamada PBP2a (de *penicillin binding protein*). Esta presenta actividad transpeptidasa, es decir, cataliza la unión de cadenas peptídicas en la pared bacteriana. Cuando tratamos una infección causada por SARM con antibióticos estándar (como la penicilina), todas las transpeptidasas del patógeno resultan bloqueadas por el antibiótico; todas menos la PBP2a, que sigue construyendo la pared bacteriana. De aquí la resistencia.

La cristalografía ha intentado desentrañar durante largo tiempo el secreto de esta proteína clave: ¿qué la hace invulne-



1945
PENICILINA
27 átomos
Molécula con poder bactericida. Desvelar su estructura abre el camino para el desarrollo de los antibióticos.

1953
ADN
Contiene las instrucciones para la síntesis de proteínas. Su estructura en doble hélice explica la herencia biológica.

Grupo que almacena el oxígeno (hemo)

1958
MIOGLOBINA
1261 átomos
Almacén y transportadora de oxígeno en los músculos. Primera proteína en ser determinada tridimensionalmente. Marca el nacimiento de la biología estructural.

1980
COMPLEMENTO
14.445 átomos
Primera línea defensiva del organismo formada por varias proteínas, entre las que destaca la convertasa (*verde claro*). El factor H (*azul, naranja, fucsia y lila*) se une a la convertasa para proteger a nuestras células sanas. Constituye una pieza clave de nuestra inmunidad.

1940 1950 1960 1970 1980

CORTESÍA DEL AUTOR (*todas las figuras*)

rable? En el año 2002, Daniel Lim y Natalie C. J. Strynadka, de la Universidad de la Columbia Británica, obtuvieron su estructura. Presentaba diferentes regiones o dominios; uno de ellos era el responsable de la actividad transpeptidasa y guardaba semejanza con el de otras PBP. El hallazgo constituyó un gran avance en el campo, pero no resolvió el misterio.

En 2013, y tras varios años de trabajo en nuestro grupo, obtuvimos cristales del complejo que forma la PBP2a con la ceftarolina, uno de los pocos antibióticos que son hoy efectivos frente al SARM. El análisis reveló algo sorprendente: la proteína resistente actuaba mediante un mecanismo alostérico, es decir, basado en interacciones que ocurrían en un lugar distinto del punto de atraque habitual.

La PBP2a posee un «interruptor» alojado muy lejos del sitio activo. Si este se halla «apagado», la proteína permanece con su sitio activo cerrado y, por tanto, insensible al ataque de los antibióticos. Ahora bien, la ceftarolina es capaz de «encender» ese interruptor uniéndose al sitio alostérico. Esta interacción desencadena toda una serie de cambios que hacen que se abra el sitio activo, quedando entonces a merced del antibiótico. La estructura del complejo PBP2a-ceftarolina presenta, pues, dos moléculas de antibiótico: una unida al sitio alostérico y otra unida al centro activo (catalítico). El hallazgo reviste gran importancia, pues facilitará el desarrollo de nuevos fármacos más eficaces.

Nuevos fármacos

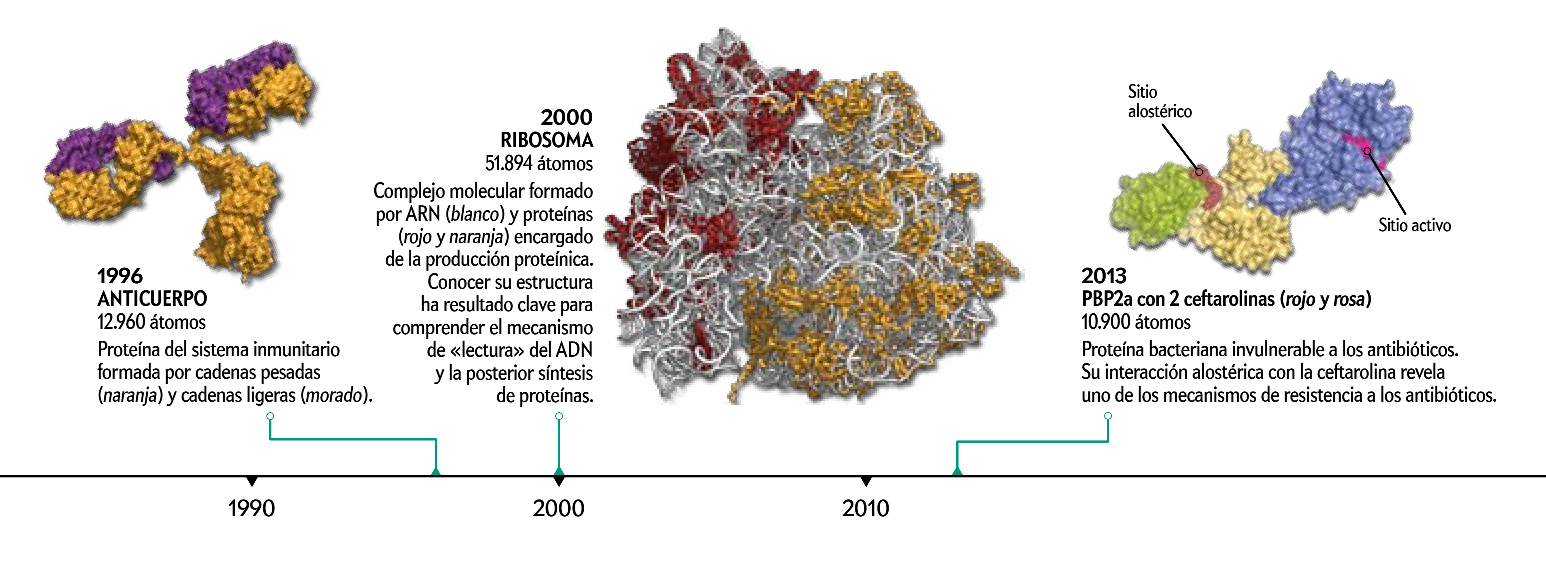
El conocimiento estructural detallado de las dianas farmacológicas (proteínas clave en el proceso patológico) que proporciona la cristalografía ha sentado las bases para el diseño de medicamentos. Ha permitido entender cómo funcionan estas biomoléculas y diseñar fármacos que se unan a ellas y que bloqueen su funcionamiento. Se ha producido, pues, un gran avance en el desarrollo de medicamentos, que ha pasado de depender de la búsqueda de principios activos en plantas o producidos por bacterias, hongos o algas, a explotar al máximo el conocimiento estructural.

Pensemos en el desarrollo de los antivíricos contra el VIH, causante del sida. Se identificó una diana clave en el proceso infeccioso, una proteasa (enzima que rompe proteínas) necesaria para la construcción del virus. La determinación estructural de esta molécula reveló los detalles de su sitio activo. A partir de este conocimiento se diseñaron moléculas capaces de bloquearlo y evitar así el funcionamiento de la proteasa. En un tiempo récord, se consiguieron distintos antivíricos y con un coste muchos millones de euros inferior al que resultaría de buscar los medicamentos mediante el modelo tradicional de prueba y error.

La cristalografía ha proporcionado también excelentes ejemplos de cómo un conocimiento básico llega a ser una herramienta imprescindible para el desarrollo aplicado. En 2009, Venkatraman Ramakrishnan, Thomas A. Steitz y Ada E. Yonath fueron galardonados con el premio Nobel por sus estudios sobre la estructura y función del ribosoma, el enorme complejo molecular (compuesto por 3 o 4 cadenas de ARN y más de 50 proteínas) que se encarga de la producción de las proteínas codificadas en el ADN. Sus hallazgos ayudaron a comprender el modo en que esta maquinaria «lee» el lenguaje codificado en el ADN para sintetizar las proteínas que conforman un ser vivo. Puesto que los ribosomas bacterianos son muy diferentes de los humanos, ello ha abierto una vía importante para el desarrollo de nuevos antibióticos como la tetraciclina o el cloranfenicol. También se ha visto que ciertos antibióticos glicosídicos, como la estreptomicina (el primer tratamiento efectivo contra la tuberculosis), se unen al ribosoma bacteriano incorporando errores en las proteínas de la bacteria, lo que en último término conduce a la muerte celular. Este conocimiento ha facilitado el desarrollo de drogas más eficaces.

La cristalografía también ha arrojado luz sobre el funcionamiento de las distintas proteínas clave en los mecanismos de virulencia y patogénesis bacteriana. Nos ha abierto los ojos a un mundo oculto hasta ahora y donde empezamos a comprender el complejo equilibrio entre una relación de simbiosis (como la que tenemos con muchas de las bacterias que habitan en el interior de nuestro organismo) y el proceso infectivo [*véase* «El neumococo. Mecanismo patogénico», por Juan A. Hermoso; Investigación y Ciencia, abril de 2007].

En este sentido, ha resultado fundamental conocer también las proteínas de nuestro sistema inmunitario, como las del complemento. El sistema del complemento corresponde a un antiguo mecanismo de defensa presente tanto en vertebrados como en invertebrados, que, como su nombre indica, complementa la destrucción de los patógenos invasores (bacterias y virus) y de células tumorales, iniciada por los anticuerpos. Constituye la primera línea defensiva presente en el plasma y otros fluidos que rodean a los tejidos. En humanos está formado por más de 30 proteínas y receptores voluminosos. Su finalidad es, en primer lugar, detectar con la mayor rapidez posible a los patógenos (o células tumorales) para proceder inmediatamente a su destruc-



1996
ANTICUERPO
12.960 átomos
Proteína del sistema inmunitario formada por cadenas pesadas (*naranja*) y cadenas ligeras (*morado*).

2000
RIBOSOMA
51.894 átomos
Complejo molecular formado por ARN (*blanco*) y proteínas (*rojo* y *naranja*) encargado de la producción proteínica. Conocer su estructura ha resultado clave para comprender el mecanismo de «lectura» del ADN y la posterior síntesis de proteínas.

2013
PBP2a con 2 ceftarolinas (*rojo* y *rosa*)
10.900 átomos
Proteína bacteriana invulnerable a los antibióticos. Su interacción alostérica con la ceftarolina revela uno de los mecanismos de resistencia a los antibióticos.

ción. Desde la publicación en 1980 de la primera estructura de una proteína del complemento, la cristalografía ha proporcionado información estructural de cada una de las vías por las que nuestro organismo reconoce al patógeno y lo elimina. Ello ha permitido desvelar, paso a paso y con una gran precisión, cómo funciona esta complejísima maquinaria de la que depende nuestra existencia.

La cristalografía ha revolucionado la comprensión de las enfermedades infecciosas y ha supuesto también una herramienta esencial en el desarrollo de los fármacos contra ellas. Ha abierto una ventana a través de la cual los investigadores pueden ver los detalles más íntimos de la lucha que se produce entre nuestro cuerpo y los microorganismos. Ha permitido conocer la estructura de los fármacos, comprender por qué funcionan unos antibióticos y otros no.

Desde la determinación de la primera estructura tridimensional de una proteína en 1958 (mioglobina), la cristalografía de proteínas ha crecido de manera exponencial hasta las 100.000 estructuras depositadas hasta ahora en la base de datos Protein Data Bank y las 700.000 estructuras de moléculas pequeñas almacenadas en el Cambridge Structural Database. La amenaza de bacterias y virus no se ha erradicado; ellos cuentan con una capacidad extraordinaria para multiplicarse y sobrevivir en prácticamente cualquier medio. Sin embargo, el conocimiento estructural nos ofrece un arma poderosísima, como nunca hasta ahora en la historia de la humanidad, que nos permite afrontar el futuro con optimismo. La solución, en el cristal.

—Juan A. Hermoso
Dpto. de cristalografía y biología estructural
Instituto de Química-Física Rocasolano, CSIC
Madrid

PARA SABER MÁS

Structural basis for the LETRA BETA lactam resistance of PBP2a from methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. Daniel Lim y Natalie C. J. Strynadka en *Nature Structural & Molecular Biology*, vol. 9, págs. 870-876, 2002.

How allosteric control of *Staphylococcus aureus* penicillin binding protein 2a enables methicillin resistance and physiological function. Lisandro H. Otero et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 42, págs. 16.808-16.813, 2013.

Structure of the AcrAB-TolC multidrug efflux pump. Eijoun Du et al. en *Nature*, abril de 2014, doi:10.1038/nature13205.

EN NUESTRO ARCHIVO

La estructura de la hemoglobina y el transporte respiratorio. M. F. Perutz en *IyC*, febrero de 1979.

Fármacos de diseño. Charles E. Bugg, William M. Carson y John A. Montgomery en *IyC*, febrero de 1994.

La proteómica en el horizonte. Carol Ezzell en *IyC*, junio de 2002.

BOTÁNICA

La geometría de las semillas

El análisis morfológico de las semillas de la alcaparra arroja luz sobre las estrategias adaptativas de esta planta

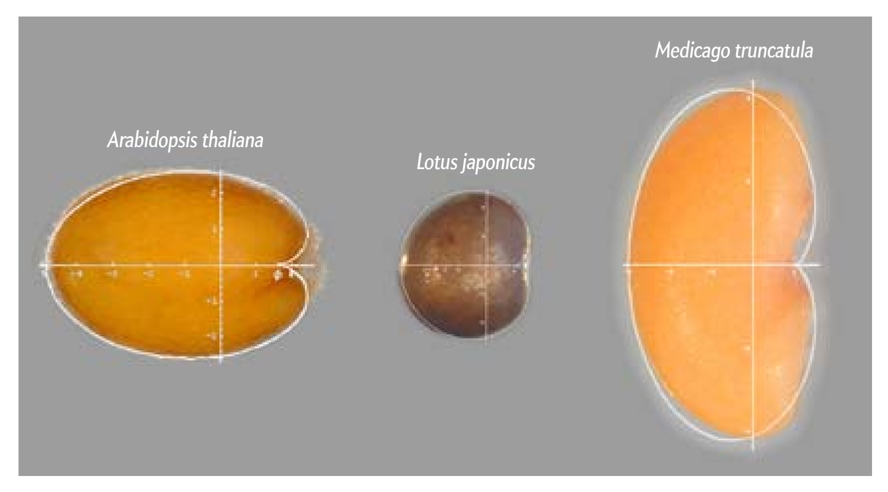
EMILIO CERVANTES, JOSÉ JAVIER MARTÍN Y EZZEDDINE SAADAOUI

La forma es una propiedad fundamental de los objetos, incluidos los que encontramos en la naturaleza. La luna es redonda, los gusanos cilíndricos y los caracoles espirales. Definir estas formas mediante fórmulas matemáticas resulta de gran utilidad para la ciencia, puesto que permite llevar a cabo descripciones detalladas y comparaciones. Sin embargo, no siempre es fácil hallar la fórmula que mejor describe una forma natural.

Los objetos redondos constituyen un caso sencillo. Puesto que la forma geométrica a la que mejor se ajustan es el círculo, para saber cuán redondo es un cuerpo basta calcular el índice de circularidad, que se expresa como 4π por el área dividida por su perímetro al cuadrado y tiene un valor igual a 1 para el círculo. Pero veamos qué ocurre cuando tratamos de describir formas menos simples, como las de ciertas semillas.

Elipses y cardioides

La forma de las semillas es variadísima. En muchos casos es redonda; pensemos en la mostaza negra (*Brassica nigra*), el guisante (*Pisum sativum*), el cilantro (*Coriandrum sativum*) o el enebro (*Juniperus communis*). En otros, como *Jatropha curcas* (euforbiácea muy utilizada en cultivos energéticos), elíptica. Pero muchas de las semillas que a primera vista guardan semejanza con una elipse, se parecen



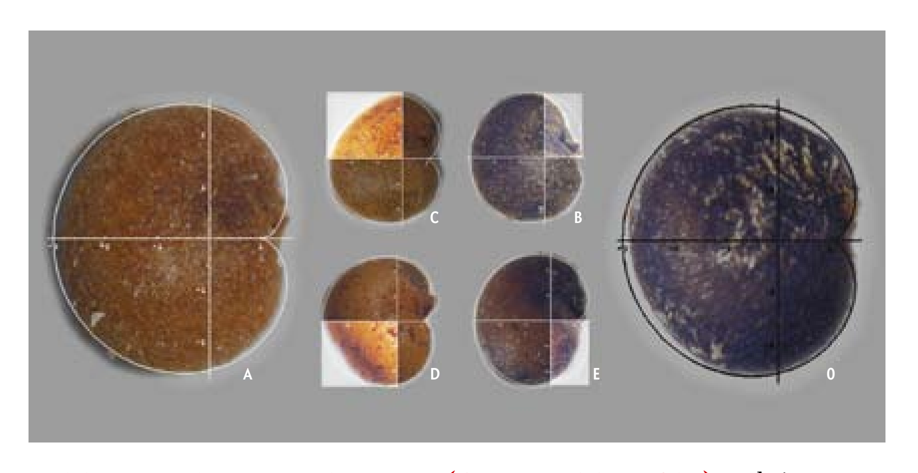
SI BIEN PUEDE PARECER REDONDEADA O ELÍPTICA, la forma de las semillas de estas plantas modelo corresponde a una cardioide (*línea blanca*). En *A. thaliana*, la cardioide se alarga horizontalmente según un factor φ; en *M. truncatula*, se produce el mismo alargamiento, pero en el eje vertical.

más a una cardioide, la curva que describe un punto de una circunferencia cuando gira sobre otra de igual radio [*véase* «La curva del corazón», por Norbert Treitz; Investigación y Ciencia, diciembre de 2008].

Ese es el caso de la planta modelo *Arabidopsis thaliana*. Aunque a primera vista las imágenes de sus semillas recuerdan a una elipse, en un trabajo publicado en 2010 en *Journal of Plant Physiology* demostramos que el ajuste es mejor cuando se comparan con una cardioide, sobre todo si esta se alarga horizontalmente en un factor φ.

En 2012 descubrimos que la cardioide sirve también para describir las semillas de las leguminosas modelo *Lotus japonicus* y *Medicago truncatula*, para la cual debe alargarse verticalmente en un factor φ (los resultados de esta investigación se publicaron también en *Journal of Plant Physiology*).

La magnitud que utilizamos para cuantificar el grado de semejanza entre la imagen fotográfica de una semilla y cierta figura geométrica es el índice J. Corresponde al cociente entre el área compartida por la imagen de la semilla y la figura geométrica, y el área total ocupada por ambas. Se expresa en porcentaje.



LAS SEMILLAS DE LA ALCAPARRA (*CAPPARIS SPINOSA*) también presentan una forma parecida a una cardioide. Esta semejanza se cuantifica mediante el índice J (que mide, en porcentaje, el cociente entre el área compartida por la imagen de la semilla y la cardioide, y el área total ocupada por ambas) y se califica según cuál sea la parte de la semilla que más difiere de una cardioide. Obtenemos así los siguientes grupos: A (J mayor que 95), B (J del primer cuadrante menor que 90), C (J del segundo cuadrante menor que 90), D (J del tercer cuadrante menor que 90) y E (J del cuarto cuadrante menor que 90). Las semillas que no pertenecen a ninguno de los tipos anteriores corresponden al tipo 0.

Las subespecies de *Capparis spinosa*

Dado que la forma de una estructura biológica guarda relación con su función, pensamos que podríamos utilizar el modelo geométrico cardioide para ahondar en las estrategias adaptativas de ciertas plantas. En concreto, nos propusimos averiguar si la forma de las semillas de la alcaparra (*Capparis spinosa*) podía aportar información sobre el modo de vida de este arbusto o la relación evolutiva entre dos subespecies del mismo que coexisten en Túnez: *rupestris* y *spinosa*. Los resultados, que comentamos a continuación, se publicaron en 2013 en *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*.

Las plantas de la subespecie *rupestris* presentan un menor tamaño y un porte arrastrado, reptante. Se encuentran adaptadas a la sequía y aridez de los desiertos del sur, con precipitaciones anuales inferiores a los 100 milímetros. Las plantas de la subespecie *spinosa* son algo más voluminosas, de porte más erecto y presentan estructuras especiales como estípulas (apéndices foliares con forma de espina). Se encuentran en el norte, en rocas o suelo profundo, y sus semillas son mayores que las de *rupestris*.

El parecido de las imágenes de las semillas de *Capparis* con una cardioide es notable. En numerosos casos, el valor de J supera el 95 por ciento; se trata de las semillas del tipo A. Si dividimos la cardioide en cuatro secciones o cuadrantes, podemos ver, para cada semilla, dónde se localizan las diferencias con el modelo geométrico. Establecemos así otros cuatro tipos: B, C, D y E, según la semejanza con la cardioide sea inferior al 90 por ciento en cada uno de los cuadrantes.

Una semilla puede pertenecer a más de uno de los tipos descritos. La que se asemeje a la cardioide en un 97 por ciento pero su parecido en el primer cuadrante sea menor que el 90 por ciento, será del tipo AB. Asimismo, puede darse el caso de semillas que no pertenezcan a ninguno de los tipos anteriores: son las del tipo 0; no acaban de coincidir con la cardioide, pero tampoco su ajuste es menor al 90 por ciento en ninguno de los cuatro cuadrantes.

Definimos, pues, cinco variables en relación con la forma de las semillas de *Capparis spinosa*: el índice J, que nos da el parecido general de la imagen de la semilla con la cardioide, y los subíndices que cuantifican esta semejanza para cada uno de los cuatro cuadrantes, JQ1, JQ2, JQ3 y JQ4. La combinación de estas variables define un total de $2^5 = 32$ morfotipos (dos opciones, afirmativa o negativa, para cada una de las cinco variables: «A» o «no A», «B» o «no B»... etcétera).

En el análisis de 100 semillas de las dos subespecies (50 para *Capparis spinosa* subsp. *rupestris* y 50 para *Capparis spinosa* subsp. *spinosa*) hemos hallado solo 14 morfotipos.

Asimismo, hemos observado una serie de características distintivas: la proporción de semillas del tipo A es semejante entre las dos subespecies; ambas se ajustan bien a la cardioide; la variación es mayor en los cuadrantes de la derecha, es decir, el primero y el tercero, situados respectivamente encima y debajo del micrópilo (las semillas están orientadas con el micrópilo a la derecha); en los cuadrantes de la izquierda (segundo y cuarto) la variación es menor; el cuadrante más variable es el primero, y las semillas del tipo B son más frecuentes en la subespecie *spinosa*. En cuando a los morfotipos, la subespecie *rupestris* presenta un total de 13 frente a 8 en *spinosa*. Por poblaciones, *spinosa* oscila entre 2 y 6; *rupestris*, entre 5 y 7.

Evolución

Nuestros resultados ponen de manifiesto las diferencias morfológicas entre las dos subespecies estudiadas. *C. spinosa* subsp. *rupestris* posee semillas más pequeñas y de tamaño y forma más variables que *C. spinosa* subsp. *spinosa*.

Además, hemos observado que la subespecie *rupestris*, con su porte arrastrado, menor tamaño y ausencia de estípulas, presenta características de la estrategia

ecológica de la «r». Esta es propia de los organismos con una estructura sencilla, escasas adaptaciones, ciclo biológico corto y gran capacidad de multiplicación; en las plantas, se da además la autofecundación. Tales especies tienen la función de fundadoras, es decir, son las primeras en establecerse en las primeras fases de la sucesión de un ecosistema. *Arabidopsis* y las leguminosas modelo *Lotus* y *Medicago*, cuyas semillas guardan una notable semejanza con la forma cardioide, son también ejemplos típicos de la estrategia de la r.

La forma de las semillas podría sumarse al conjunto de características de las plantas con la estrategia de la r (entre las que se incluyen numerosas plantas modelo). Proponemos la hipótesis que, para cada familia de plantas, las especies con rasgos propios de la estrategia de la r poseen semillas pequeñas que adoptan morfologías de figuras geométricas, de forma y tamaño variables. Tal variabilidad facilitaría la aparición de nuevas adaptaciones frente a cambios ambientales. Nuestros resultados sobre la comparación de las formas de las semillas de la alcaparra vienen a coincidir con los de S. Fici, del Departamento de Ciencia Botánica de Palermo, publicados en *Plant Systematics and Evolution* en 2001, que sugieren que la subespecie *rupestris* es más primitiva que *spinosa*. Esta última tal vez divergió de la estrategia de la r y adquirió adaptaciones más especializadas: semillas más grandes, estructuras más complejas (porte erecto, presencia de estípulas) y reproducción cruzada.

Pensamos que la aplicación del análisis morfológico descrito a otras familias de plantas permitirá establecer nuevas relaciones entre la forma de la semilla, el ciclo biológico de la especie y la evolución de un grupo de especies relacionadas entre sí.

—Emilio Cervantes y José Javier Martín
Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca
CSIC
—Ezzeddine Saadaoui
Instituto Nacional de Investigación en Ingeniería Rural, Aguas y Bosques
Universidad de Cartago
Túnez

PARA SABER MÁS

Modeling the *Arabidopsis* seed shape by a cardioid: Efficacy of the adjustment with a scale change with factor equal to the Golden Ratio and analysis of seed shape in ethylene mutants. E. Cervantes et al. en *Journal of Plant Physiology*, vol. 167, págs. 408-410, 2010.

Intraspecific variability of seed morphology in *Capparis spinosa* L. E. Saadaoui, J. J. Martín Gómez y E. Cervantes en *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, vol. 55, págs. 1-8, 2013.

BIOGEOGRAFÍA

¿Qué mecanismos regulan la distribución de la biodiversidad?

El ADN mitocondrial revela que las diferencias entre comunidades biológicas distantes se deben, sobre todo, a las limitaciones en la dispersión de individuos

ANDRÉS BASELGA

Conservar la biodiversidad es —o debería ser— una de las prioridades de nuestra sociedad. Para ello resulta esencial comprender los procesos que la generan. En este sentido, uno de los fenómenos que más contribuye a la diversidad de especies total es la heterogeneidad de las comunidades biológicas (conjunto de especies que vive en un lugar), que son distintas en función de la localidad que habitan.

La variación en la presencia de unas u otras especies en las comunidades biológicas viene determinada, en gran medida, por la distancia: a mayor separación entre dos enclaves, más diferentes son sus comunidades biológicas. ¿A qué se debe este patrón de descenso de la similitud biológica con la distancia geográfica? Esta es la cuestión que abordamos en un estudio que publicamos el año pasado en *Nature Communications*, en colaboración con el equipo de Alfried Vogler, del Museo de Historia Natural de Londres.

Teorías contrapuestas

Explicar por qué las comunidades biológicas son más diferentes cuanto más alejadas se encuentran no es tan sencillo como pudiera parecer a primera vista. De hecho, se han propuesto dos hipótesis contrapuestas para explicar este fenómeno.

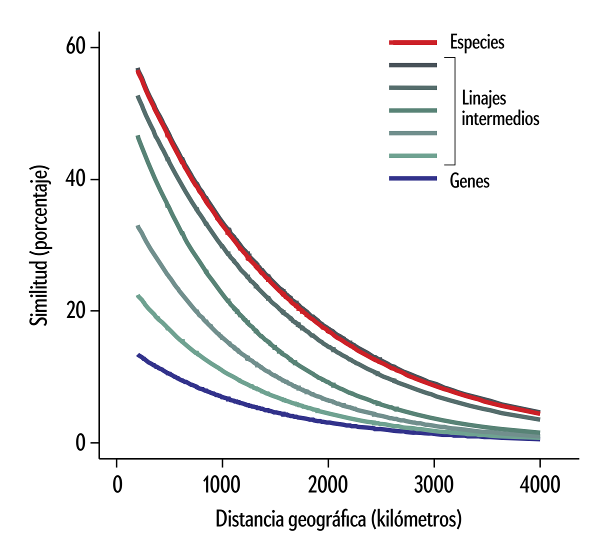
La primera, la teoría del nicho ecológico, postula que las condiciones ambientales son las responsables de que una especie pueda vivir o no en un lugar. Las localidades próximas, al ofrecer condiciones ambientales similares, favorecen la presencia de las mismas especies. Por contra, las localidades más alejadas presentan mayores diferencias entre sus ambientes y, por tanto, también entre las especies que pueden habitar allí.

La teoría neutral de la biodiversidad, en cambio, afirma que el papel del ambiente sería irrelevante en comparación con el que desempeñan los procesos de dispersión (migración de los individuos de un lugar a otro). Según esta segunda hipótesis, dos localidades alejadas en el espacio alojan comunidades biológicas muy diferentes simplemente porque las especies de una no han podido llegar a la otra.

Los estudios previos al nuestro no habían logrado descartar ninguna de las dos hipótesis. Ello se debía, entre otras cosas, a una dificultad metodológica: dado que la distancia geográfica guarda relación con la diferencia en las condiciones ambientales, los efectos de ambos parámetros son muy difíciles de distinguir. Debíamos, por tanto, adoptar un nuevo enfoque en el que un factor no enmascarara al otro.

Basamos nuestra investigación en el análisis del ADN mitocondrial. El uso de este marcador genético permite una nueva aproximación al problema mencionado, ya que las diferentes variedades genéticas mitocondriales no tienen por qué estar asociadas a condiciones am-

bientales determinadas. Esto es así porque, en principio, las condiciones climáticas no seleccionan mutaciones específicas del ADN mitocondrial, sino que estas se van acumulando al azar. La distribución geográfica de las mismas es, por tanto, independiente del nicho ecológico.



LA SIMILITUD entre comunidades biológicas desciende conforme aumenta la distancia que las separa. Ello se observa en todos los niveles analizados en el estudio, desde los genes hasta las especies, pasando por los linajes intermedios.

De los genes a las especies

Nos centramos en las comunidades de coleópteros acuáticos de 23 localidades de Europa, situadas entre Suecia y el norte de Marruecos. Se estudiaron más de 5000 individuos pertenecientes a 274 especies. Ello nos permitió determinar la composición de las comunidades biológicas, no solo en función de las especies que albergaban, sino también según sus variedades genéticas (derivadas de mutaciones recientes o pertenecientes a linajes de antigüedad intermedia).

Una vez conocida la composición biológica de las distintas comunidades de coleópteros acuáticos, estudiamos cómo variaba esta en función de la distancia geográfica. Los resultados demostraron un patrón de descenso en la similitud biológica equivalente en todos los niveles jerárquicos, incluido el de especie. Es decir, según nuestra investigación, la tasa con la que se substituyen unas variedades genéticas por otras al aumentar la distancia geográfica es la misma con la que se substituyen unas especies por otras.

Este hallazgo sugiere la existencia de un único factor responsable, común a todos los niveles, de que la similitud disminuya con la distancia. Puesto que, como ya hemos dicho, el nicho ecológico no opera sobre la distribución de las variedades genéticas mitocondriales, ese factor causal común debe corresponder a procesos neutrales relacionados con la dispersión de los individuos entre comunidades.

Para corroborar esta interpretación, llevamos a cabo simulaciones informáticas en las que se recrearon las distribuciones de las especies y sus variedades genéticas en escenarios puramente neutrales (en los que solo contaba la dispersión limitada y aleatoria) y en escenarios controlados por el nicho ecológico (las especies solo podían vivir en ciertas condiciones ambientales). Las simulaciones que mejor describieron los resultados observados en los coleópteros acuáticos europeos fueron las neutrales. Ello no significa que las condiciones ambientales no influyan en los seres vivos a través del nicho ecológico, sino que, a grandes escalas temporales y espaciales, su efecto es irrelevante para explicar la distribución de las especies y, por tanto, la diversidad biológica.

Esta nueva aproximación, basada en el análisis a múltiples niveles (de los genes a las especies) es aplicable a otros sistemas (grupos de animales y plantas, regiones geográficas). Abre, por tanto, la puerta a una nueva generación de estudios macroecológicos que permitirán avanzar en nuestro conocimiento sobre los orígenes de la biodiversidad.

—Andrés Baselga
Dpto. de zoología
Universidad de Santiago de Compostela

ALEXANDRE PORTHEAULT (*coleóptero*)

LOS COLEÓPTEROS ACUÁTICOS que medran en Europa han ayudado a desentrañar los mecanismos que regulan la distribución de la biodiversidad. En la imagen, un ejemplar de *Eretes sticticus*, fotografiado en el sur de la península ibérica.

PARA SABER MÁS

Whole-community DNA barcoding reveals a spatio-temporal continuum of biodiversity at species and genetic levels. A. Baselga et al. en *Nature Communications*, vol. 4, n.º 1892, mayo de 2013.



PALEONTOLOGÍA

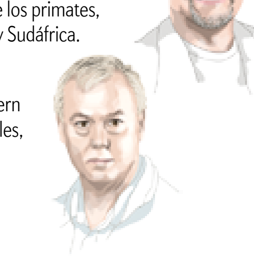
Buscar fósiles mediante satélites

La suerte ha sido fundamental en muchos de los descubrimientos

DESCUBRIR FÓSILES en un área tan grande como la cuenca de la Gran Divisoria, en Wyoming, ha sido durante mucho tiempo como buscar una aguja en un pajar. Pero un método innovador aumenta la probabilidad de los hallazgos.

de los fósiles más importantes. Nuevos modelos de información geográfica guían ahora la localización de yacimientos

Robert L. Anemone y Charles W. Emerson



Robert L. Anemone es catedrático y director del departamento de antropología de la Universidad de Carolina del Norte en Greensboro. Como paleontólogo interesado en la evolución humana y de los primates, ha excavado en yacimientos de Wyoming, Montana, Kenia y Sudáfrica.

Charles W. Emerson es profesor de geografía en la Universidad Western Michigan. Además de desarrollar mapas predictivos para localizar fósiles, colabora en un proyecto que utiliza imágenes de satélite para evaluar cómo afectan los factores económicos y las políticas de protección ambiental en las tierras de pastoreo de la China rural.

En un caluroso día de julio de 2009, una caravana de todoterrenos atravesaba una pista de tierra en la cuenca de la Gran Divisoria, en el sudoeste de Wyoming. La expedición se dirigía a una zona conocida como Salt Sage Draw en busca de un tesoro enterrado: fósiles de hace entre 55 y 50 millones de años, de inicios del período Eoceno, cuando los antepasados de muchos de los órdenes actuales de mamíferos empezaban a sustituir a otros más arcaicos del período anterior, el Paleoceno. Uno de nosotros (Anemone) dirigía un equipo de antropólogos, paleontólogos y geólogos que trabajaba en la cuenca desde 1994. Salt Draw Sage había demostrado ser una zona muy fructífera en los últimos años donde se habían recuperado fósiles en diferentes localidades. Sin embargo, esta vez nos costaba encontrar el yacimiento. Me di cuenta de que íbamos por un camino diferente del que tomábamos años anteriores. Mi error se convertiría en un golpe de fortuna.

Cuando la pista empezaba a desaparecer entre las artemisas y la hierba alta, hice detener la caravana y caminé un poco para ver si podía localizar el camino más adelante. Al rodear una pequeña colina, observé un extenso depósito de arenisca cerca de allí y también el camino huidizo justo al lado. A menudo, la arenisca de la cuenca de la Gran Divisoria y de otras cuencas sedimentarias en el oeste de Estados Unidos alberga fósiles. Así que decidí inspeccionar estos depósitos antes de reanudar nuestro viaje a Salt Sage Draw. Después de prospectar la roca a gatas durante una hora, Tim Held y Justin Gish, por entonces estudiantes de posgrado, gritaron que habían descubierto un par de mandíbulas de mamífero bien conservadas. Me uní a ellos con entusiasmo. Las mandíbulas fósiles con dientes son muy apreciadas porque contienen suficiente información para identificar la especie a la que pertenecen, aunque falten otras partes del esqueleto, y porque permiten deducir la dieta del animal.

Lo que sucedió después solo puede ser descrito como el sueño de todo paleontólogo. Mis alumnos habían localizado un punto de concentración de fósiles. Pero no se trataba de un lugar corriente con un puñado de mandíbulas o unas pocas docenas de dientes y huesos enterrados en la arenisca. Habían hallado un tesoro extraordinario, un yacimiento del que hasta ahora hemos recuperado cerca de 500 mandíbulas bien conservadas y varios miles de dientes y huesos de más de 20 especies de mamíferos que vivieron hace unos 50 millones de años. Llamamos a este lugar «la Confesión de Tim», y hoy no solo representa el mejor yacimiento de toda la cuenca, sino que también es uno de los que ha proporcionado más fósiles de mamíferos del Eoceno inferior en el oeste de Estados Unidos.

Desde luego, mi equipo no ha sido el primero en realizar un descubrimiento importante de forma accidental. La historia de la paleontología está llena de relatos de golpes de suerte. De hecho, la forma en que los paleontólogos de vertebrados intentan localizar yacimientos ricos en fósiles no ha cambiado mucho desde los primeros días de nuestra ciencia. Al igual que los pioneros en este campo del siglo xix, utilizamos información geológica y topográfica para determinar dónde hay más oportunidades de hallar fósiles que emergen por la ero-

EN SÍNTESIS

Durante más de un siglo, los paleontólogos han utilizado información geológica y topográfica para saber dónde buscar fósiles. Pero el descubrimiento de estos sigue siendo en gran parte fruto de la casualidad.

Nuevos métodos digitales que utilizan patrones ocultos en las imágenes de satélite generan mapas de los lugares que pueden contener fósiles y ayudan a los paleontólogos en su trabajo.

La comprobación directa de estos mapas predictivos en el oeste de Estados Unidos ha demostrado que mejoran las probabilidades de hallar yacimientos fosilíferos. En teoría, este método podría ser empleado en cualquier parte del mundo.

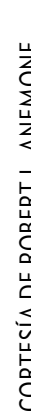
PÁGINAS ANTERIORES: ANDREW GEIGER





EN 2009, LOS PALEONTÓLOGOS DESCUBRIERON POR AZAR **una concentración de fósiles de unos 50 millones de años en un yacimiento que se bautizó como «la Confesión de Tim», en la cuenca de la Gran Divisoria, Wyoming (*derecha*). Entre los hallazgos hay cientos de mandíbulas de mamíferos bien conservadas (*arriba*). Los modelos informáticos han permitido al equipo centrar sus esfuerzos en aquellas áreas con mayor probabilidad de proporcionar fósiles, como este punto al sur de un volcán extinto conocido como Boar's Tusk (*abajo*).**





CORTESÍA DE ROBERT L. ANEMONE

sión de sedimentos antiguos. Pero más allá de ese proceder, los hallazgos son en gran parte producto de la casualidad; la mayoría de las veces, el duro trabajo de buscar fósiles queda sin recompensa.

Nuestra experiencia en «la Confesión de Tim» me hizo pensar si podría haber una mejor manera de determinar dónde deberíamos concentrar los esfuerzos para descubrir nuevos yacimientos. Sabíamos que los fósiles en los que estábamos interesados se hallaban en areniscas (un tipo de roca que data de entre 55 y 50 millones de años). Conocíamos también los lugares de la cuenca donde este tipo de estratos habían quedado expuestos, por lo que podían resultar adecuados para la exploración. Pero aunque tal información nos ayudaba a reducir el área de búsqueda, todavía quedaban miles de kilómetros cuadrados de terreno por explorar y muchas posibilidades de regresar con las manos vacías.

Entonces, una noche en el campamento, empezó a germinar una idea. A campo abierto, a kilómetros de distancia de cualquier fuente de contaminación lumínica, solíamos ver pasar en el cielo los satélites. Me preguntaba si de algún modo podríamos combinar nuestro gran conocimiento de la geología, topografía y paleontología de la cuenca de la Gran Divisoria con las imágenes de satélite de un área de 10.000 kilómetros cuadrados, con el fin de cartografiar los puntos más probables de concentración de fósiles. Quizá los satélites podían «ver» características de la Tierra que no podíamos percibir desde el suelo y nos ayudarían a encontrar afloramientos de arenisca y distinguir aquellos que podrían proporcionar fósiles de los que no.

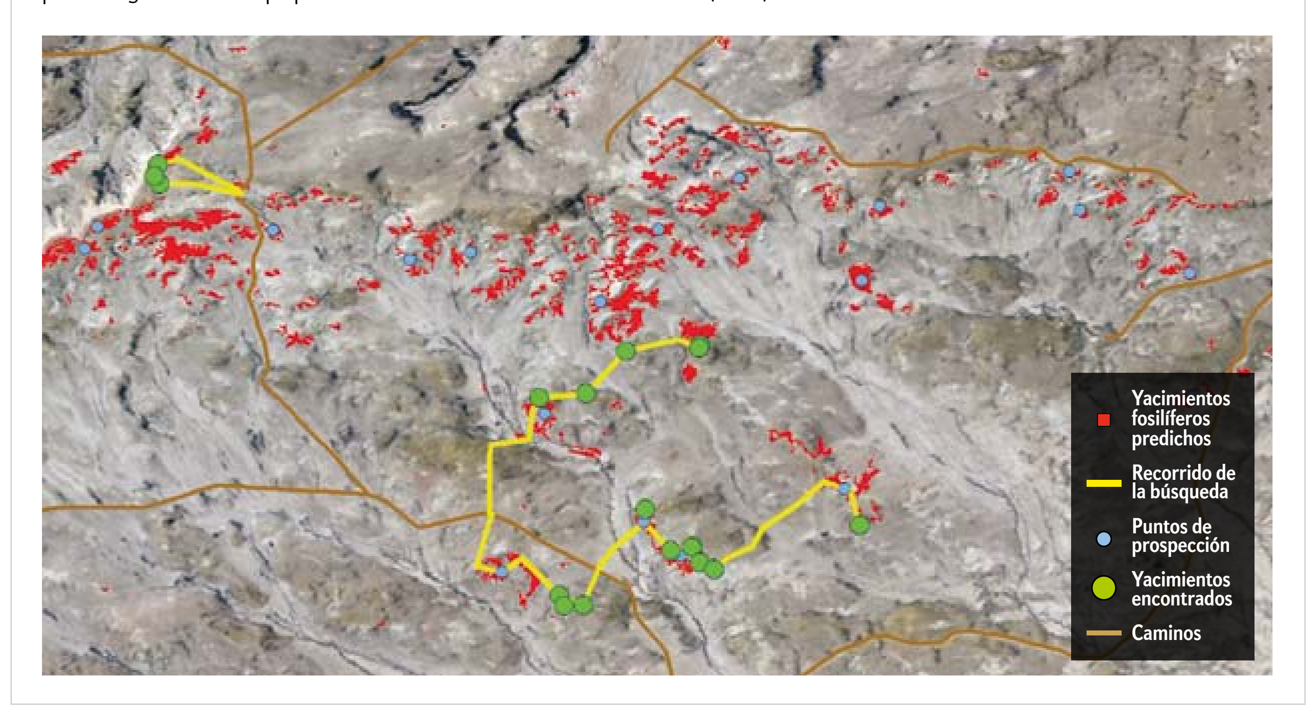
OJOS EN EL CIELO

Por supuesto, otros paleontólogos ya habían examinado si las imágenes de satélite pueden mejorar la localización de fósiles en el campo. Como especialista en el registro fósil de la evolución humana y de primates, sabía que, en los años noventa del siglo xx, Berhane Asfaw, del Servicio de Investigación del Valle del Rift, y sus colaboradores habían utilizado este tipo de imágenes para identificar afloramientos rocosos de Etiopía que pudieran proporcionar fósiles humanos. En esa misma época, Richard Stucky, del Museo de Naturaleza y Ciencia de Denver, había demostrado que las imágenes satelitales permitían identificar y cartografiar los diferentes tipos de roca del valle del río Wind en el centro de Wyoming. En ambos proyectos colaboraron paleontólogos y especialistas de teledetección de la NASA y se puso de manifiesto el valor del trabajo interdisciplinar. Pero me preguntaba si había una manera de obtener más información de las imágenes y así dirigir mejor nuestra búsqueda.

Contacté con un geógrafo, el otro autor de este artículo (Emerson), y juntos esbozamos un plan. En primer lugar, obtendríamos

El mapa del tesoro

Los modelos informáticos analizan imágenes de satélite de un área con yacimientos fosilíferos conocidos para identificar su perfil común de radiación. Después evalúan una región más amplia para descubrir otros puntos con ese mismo perfil y que, por tanto, pueden albergar fósiles de interés. Esta técnica nos permitió generar un mapa predictivo de la cuenca de la Gran Divisoria con posibles yacimientos (*rojo*) y nos ayudó a orientar nuestra búsqueda (*amarillo*). En comparación con expediciones anteriores, en las que no disponíamos de estos mapas, restringir la prospección y centrarnos en algunas de estas áreas (*azul*) aumentó mucho nuestras posibilidades de localizar yacimientos (*verde*).



CORTESÍA DEL SERVICIO GEOLÓGICO DE EE.UU. (*imagen de satélite*); CORTESÍA DE CHARLES W. EMERSON Y ROBERT L. ANEMONE (*puntos*)

las imágenes de libre acceso de la cuenca capturadas por el satélite Landsat 7 con el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Este detecta la radiación reflejada o emitida por la superficie de la Tierra en longitudes de onda que abarcan el espectro electromagnético, desde el azul al infrarrojo, y la representa en ocho bandas espectrales. Tales bandas pueden utilizarse para distinguir, por ejemplo, la vegetación del terreno y cartografiar depósitos minerales. Después teníamos que desarrollar un método para caracterizar el perfil de radiación de las localidades fosilíferas ya conocidas en la cuenca de la Gran Divisoria y comprobar si todas ellas presentaban un mismo perfil espectral. Si era así, utilizaríamos ordenadores para localizar nuevos sitios en la cuenca con el mismo perfil y que, por tanto, tendrían una alta probabilidad de contener fósiles. Por último, visitaríamos esos lugares (así como otros con perfiles espectrales distintos) y buscaríamos fósiles de forma exhaustiva para verificar el método.

No resultó fácil determinar si los yacimientos ya conocidos compartían un perfil espectral distintivo, ya que para cada lugar debíamos evaluar la combinación de valores en seis de las bandas del espectro electromagnético proporcionadas por los datos del Landsat. La principal dificultad consistía en reconocer un patrón en múltiples dimensiones, algo que a los humanos nos cuesta, pero que las computadoras realizan a la perfección. Desarrollamos así lo que se denomina una red neuronal artificial, un modelo informático capaz de analizar y «aprender» patrones complejos.

De hecho, la red reveló que los yacimientos fosilíferos de la cuenca poseían un perfil espectral común y que podíamos distinguir fácilmente las zonas de arenisca de otros tipos de cobertura del suelo, como humedales y dunas de arena. Pero el modelo presenta ciertas limitaciones. Por su propia naturaleza, las redes neuronales artificiales son como «cajas negras» de análisis. Es decir, si bien pueden distinguir patrones, no informan sobre los factores que permiten diferenciar un patrón de otro. De este modo, aunque nuestro modelo distinguía con rapidez y precisión las localidades con fósiles de los humedales o las dunas de arena, no nos indicaba cómo cambiaba el perfil espectral de los diversos terrenos en las seis bandas del Landsat; disponer de esta información tal vez nos habría ayudado a concentrar nuestra búsqueda.

Otra de las limitaciones del modelo es que se basa en el análisis de píxeles individuales. El problema radica en que el área que cubre cada píxel del Landsat mide 225 metros cuadrados y no se corresponde necesariamente con el tamaño de los yacimientos. Algunas localidades resultan más extensas que un píxel individual, mientras que otras son más reducidas. Por consiguiente, las predicciones de la red neuronal sobre la ubicación y el tamaño de los posibles yacimientos fósiles (o, en este caso, de un cierto tipo de cobertura del suelo) no siempre coinciden con la realidad.

Para superar estas limitaciones necesitábamos analizar múltiples píxeles adyacentes y con espectros similares, y describir

estadísticamente el perfil espectral distintivo de toda la zona, bien se tratara de un yacimiento o de un bosque. Decidimos aplicar una técnica conocida como análisis de imágenes basado en objetos (OBIA, por sus siglas en inglés) y, además, obtuvimos imágenes comerciales de satélite de alta resolución en las que los píxeles individuales medían menos de un metro de diámetro. A diferencia de la red neuronal artificial, este enfoque permite separar las imágenes satelitales en diferentes objetos (formados por grupos de píxeles de perfil espectral homogéneo) que pueden caracterizarse mediante parámetros estadísticos, como la media o mediana del brillo o textura. Estos objetos se corresponden mejor con los puntos de interés sobre el terreno, como yacimientos o zonas forestales. A partir de esta técnica de análisis, desarrollamos un modelo para predecir dónde hallar lugares con fósiles.

EL MOMENTO DE LA VERDAD

Los dos modelos predictivos proporcionaron mapas de la cuenca de la Gran Divisoria y señalaban áreas inexploradas con perfiles espectrales similares a los de los yacimientos conocidos. Aunque ambos mostraban un alto grado de solapamiento en sus predicciones, también diferían en algunos casos. Optamos por centrarnos en aquellos lugares que ambos modelos identificaban como posibles yacimientos con mayor probabilidad. Con los mapas en la mano, nos dirigimos a Wyoming durante los veranos de 2012 y 2013 para ver si nuestros modelos nos llevaban a nuevos conjuntos con fósiles. Para nuestra satisfacción, cumplieron con esa expectativa.

Examinamos 31 lugares que, según indicaba nuestro modelo, poseían un perfil espectral similar al de yacimientos conocidos y hallamos fósiles de vertebrados en 25 de ellos

El modelo de red neuronal artificial resultó muy eficiente a la hora de identificar depósitos de arenisca, que siempre vale la pena explorar porque muchos de ellos contienen fósiles de vertebrados. Una de las primeras localidades con arenisca que visitamos en julio de 2012 nos proporcionó una docena de fósiles de mamíferos característicos del Eoceno, entre ellos el caballo de cinco dedos (*Hyracotherium*), un primate arcaico (*Cantius*) y otras especies de Condylarthra, un grupo extinto de mamíferos ungulados. La red neuronal artificial también nos guio hasta varios yacimientos donde hallamos fósiles de vertebrados acuáticos, entre ellos peces, cocodrilos y tortugas.

El mapa obtenido con la técnica OBIA también nos permitió encontrar nuevos yacimientos. Tras un comienzo poco esperanzador, ya que en los primeros tres o cuatro lugares no hallamos ningún fósil, nos trasladamos a la parte norte de la cuenca, cerca de una zona llamada Freighter Gap, donde durante una semana intensa verificamos sobre el terreno nuestra nueva técnica. Casi de inmediato comenzamos a descubrir fósiles en muchos puntos de esta zona. Examinamos 31 lugares que nuestro modelo indicaba que poseían un perfil espectral similar al de las localidades conocidas y encontramos fósiles de vertebrados en 25 de ellos, un porcentaje de éxito muy superior al que se obtiene cuando se prospecta sin la ayuda de un mapa predictivo. Los fósiles de mamíferos que aparecieron en diez de estos yacimientos, uno de los cuales se remonta al final del Paleoceno, son extremadamente inusuales.

Tenemos muchas razones para creer que los modelos predictivos como los que hemos desarrollado en la cuenca de la Gran Divisoria pueden funcionar en otras regiones. De hecho, deberían poder aplicarse casi en cualquier lugar del mundo. En teoría, si se dispone de imágenes de satélite de la región en cuestión y de unos cuantos yacimientos conocidos con los que «entrenar» el modelo, se puede generar un mapa personalizado que indique los posibles lugares de la región que albergan fósiles.

En una comprobación conservadora del método, utilizamos la red neuronal desarrollada en la cuenca de la Gran Divisoria para predecir la localización de sedimentos fosilíferos en la cercana cuenca del Bisonte, una región que cuenta con yacimientos de mamíferos del Paleoceno. (No entrenamos el modelo con datos de yacimientos de la nueva zona, ya que ambas cuencas poseen los mismos tipos de depósitos.) Resultó alentador que nuestra red neuronal predijera la ubicación de las tres localidades fosilíferas más productivas que se conocen en la cuenca del Bisonte. Por consiguiente, un equipo que explorase por primera vez esta área tan extensa tendría muchas más posibilidades de descubrir estos yacimientos con nuestro modelo que con los métodos de prospección tradicionales.

Nuestras campañas de 2012 y 2013 en Wyoming demostraron que el empleo conjunto de imágenes de satélite y de modelos predictivos geoespaciales aumentaba la efectividad de nuestro trabajo de campo. Pero aún nos queda mucho por hacer. En la actualidad estamos perfeccionando nuestros modelos para caracterizar y diferenciar mejor el perfil espectral de los yacimientos productivos. Y estamos intentando aplicar más restricciones a nuestros modelos para reducir el número de resultados positivos falsos en los mapas que generamos, de modo que podamos determinar mejor las áreas donde priorizar la búsqueda.

Estamos convencidos de que estas herramientas aportarán una base más segura y científica a la exploración paleontológica del futuro y reducirán el papel del azar en el descubrimiento de fósiles importantes. Sin duda, los esfuerzos para lograrlo habrán valido la pena. Reconstruir el origen y la evolución de la vida en la Tierra constituye una empresa demasiado relevante como para dejarla en manos de la suerte.

PARA SABER MÁS

GIS and paleoanthropology: Incorporating new approaches from the geospatial sciences in the analysis of primate and human evolution. R. L. Anemone, G. C. Conroy y C. W. Emerson en *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 54, suplemento n.º 53, págs. 19-46, 2011.

Finding fossils in new ways: An artificial neural network approach to predicting the location of productive fossil localities. Robert Anemone, Charles Emerson y Glenn Conroy en *Evolutionary Anthropology*, vol. 20, n.º 5, págs. 169-180, septiembre/octubre de 2011.

An artificial neural network-based approach to identifying mammalian fossil localities in the Great Divide Basin, Wyoming. Charles W. Emerson y Robert L. Anemone en *Remote Sensing Letters*, vol. 3, n.º 5, págs. 453-460, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen del género *Homo*. Kate Wong en *IyC*, junio de 2012.

MEDICINA

Desactivar el cáncer

Eliminar los obstáculos que las células tumorales levantan frente al sistema inmunitario constituye la estrategia de una nueva generación de tratamientos poderosos contra esta enfermedad maligna

Jedd D. Wolchok





Jedd D. Wolchok es jefe del Servicio de Melanomas e Inmunoterapias en el Centro Oncológico Conmemorativo Sloan Kettering, en la ciudad de Nueva York. Es asesor de las compañías farmacéuticas Bristol-Meyers Squibb, Merck, MedImmune y EMD Serono, pero no tiene ningún tipo de interés económico en los medicamentos mencionados en este artículo.



EN JUNIO DE 2004 ME PIDIERON que examinase a una mujer de 22 años que acababa de graduarse en la universidad y que pronto iba a contraer matrimonio. Durante los meses anteriores a su graduación, Shirley —no es su verdadero nombre— había estado padeciendo una tos persistente. Al final, una tomografía axial computarizada (TAC) puso de manifiesto múltiples masas dentro y alrededor de sus pulmones. Una biopsia reveló un melanoma metastásico que se había propagado a partir de un cáncer de piel que Shirley ignoraba que sufría. Tras aplazar a toda prisa la fecha de su boda, se sometió de inmediato a sesiones de quimioterapia.

Por desgracia, las dos tandas de quimioterapia y la radioterapia aplicada durante los dos años siguientes ralentizaron pero no lograron detener la propagación del tumor. A Shirley se le estaban agotando las opciones. Le hablé de un nuevo estudio en el que se estaba evaluando un medicamento innovador que estimulaba el sistema inmunitario del paciente para que pudiera combatir el cáncer.

Se trataba de un ensayo aleatorio, lo que significaba que no todos los participantes recibirían el nuevo fármaco (por aquel entonces denominado MDX-010), pero Shirley decidió participar. Tras cuatro tratamientos, una nueva serie de TAC demostró que no quedaba ni rastro del melanoma. En la actualidad, su enfermedad ha remitido por completo: tiene dos niños preciosos y sanos y, según sus propias palabras, «ha recuperado la vida».

Para mí, como oncólogo e investigador, la evolución de Shirley supuso ver cumplidas las esperanzas, albergadas desde hacía años, de obtener un tratamiento enérgico contra el cáncer que intensificara la respuesta inmunitaria del paciente contra la enfermedad. El año pasado, el optimismo se extendió por toda la comunidad médica, a medida que íbamos teniendo conocimiento de éxitos similares con este y otros tipos de inmunoterapia semejantes en pacientes con leucemia avanzada, cáncer de riñón o de pulmón. Aunque esta intervención no es en modo alguno la panacea, los avances recientes nos pueden permitir actuar en las etapas finales del cáncer con mucho mayor éxito de lo que habíamos logrado en las últimas décadas.

MÚLTIPLES LÍNEAS DEFENSIVAS

La idea de que el sistema inmunitario pueda hacer frente al cáncer no es nueva. Los intentos por encarrilar las defensas del huésped contra el proceso maligno se remontan a hace más de cien años, cuando William Coley, cirujano del Hospital Oncológico de Nueva York (que hoy en día es el Centro Oncológico Conmemorativo Sloan Kettering), utilizó con este fin bacterias destruidas mediante calor. Al observar que algunos pacientes parecían vivir más tiempo si sufrían una infección tras ser operados de cáncer, Coley aventuró la hipótesis de que el sistema defensivo intrínseco que se había movilizado contra el patógeno también podría atacar al tumor.

Durante las décadas siguientes, la investigación básica ha generado mucha información sobre las células que forman parte de este mecanismo de protección, así como sobre los mediadores químicos e interruptores moleculares que lo controlan con precisión. En ese tiempo, se ha descubierto el modo en que se activa el sistema inmunitario para detectar patógenos infecciosos, como bacterias y virus. Y lo que resulta igual de importante, se han identificado los múltiples mecanismos de control y equilibrio que indican al sistema inmunitario cuándo debe limitar su respuesta para no destruir en exceso el tejido normal. Con todo ello, se ha alcanzado un conocimiento detallado sobre cómo reacciona el sistema inmunitario ante el cáncer y cómo se ve alterado por él.

La primera línea de defensa contra los patógenos se basa en una respuesta general contra bacterias y virus coordinada por cierto tipo de leucocitos, los neutrófilos y los monocitos. Estas células pertenecen al sistema inmunitario innato y su función consiste en reconocer determinados rasgos moleculares presentes en todas las bacterias y virus; entre ellos, algunas regiones de su envoltura externa, o ciertas peculiaridades de la estructura del ADN o ARN inexistentes en los organismos superiores. Aunque el ataque de estos leucocitos no está dirigido contra una especie o una proteína específica, consigue, no obstante, destruir muchos de los invasores microbianos y, como resultado, generar fragmen-

EN SÍNTESIS

Los tratamientos oncológicos tradicionales atacan directamente al cáncer. La inmunoterapia, en cambio, intenta estimular las defensas del propio organismo contra la enfermedad.

En la actualidad, la mayoría de las inmunoterapias tratan de impulsar una respuesta contra los tumores, del mismo modo en que un conductor aumenta la velocidad de un coche al pisar el acelerador.

Una nueva estrategia consiste en eliminar los obstáculos que reprimen una respuesta inmunitaria que de otro modo resultaría poderosa.

Algunos ensayos clínicos han arrojado resultados extraordinarios y duraderos en diversos tipos de tumores, como el melanoma metastásico y estados avanzados de cáncer de riñón y de pulmón.

PÁGINAS ANTERIORES: CHRISTOPHER BUZELLI

Un remedio en dos pasos

La investigación básica sobre cómo intenta el sistema inmunitario combatir el cáncer, aunque a veces no lo consiga (*ruta marcada en gris*), llevó al desarrollo de nuevas estrategias (*azul*) para potenciar las propias defensas del organismo contra un tumor.

Dar un empujón a la naturaleza

Uno esperaría que el sistema inmunitario fuese capaz de destruir los tumores, pero los mecanismos de control y equilibrio del propio organismo pueden reprimir esa aptitud. Además, algunos tumores interfieren directamente en la respuesta inmunitaria. En esta figura se muestra cómo el sistema inmunitario reconoce un tumor 1 y, después, se autoinhibe 2; también se representa una táctica con la que el tumor engaña a las células inmunitarias para que le dejen en paz 3.

Intervención: Impedir el suicidio celular

Al bloquear la proteína PD-1 situada en la superficie de los linfocitos T, se evita que la célula cancerosa desencadene la secuencia de autodestrucción del linfocito.



PD-1

Anticuerpo inhibidor

1 Una célula inmunitaria denominada célula dendrítica digiere determinadas moléculas que se hallan en la superficie del tumor.

Tumor

PD-1

Desencadena el suicidio de los linfocitos T

3 Normalmente, un linfocito T activado se dirige a una célula cancerosa para destruirla. Pero si el tumor produce una proteína que se une a la molécula PD-1 presente en la superficie del linfocito, este se autodestruye en lugar de atacar a la célula cancerosa.

Célula dendrítica

Maduración de las células inmunitarias

Acelerador

Célula dendrítica

Proliferación

Linfocito T inmaduro

CTLA-4

Freno

2 La célula dendrítica presenta el fragmento del tumor a un linfocito T inmaduro. Solo si a la vez se activa una proteína aceleradora, el linfocito T se multiplica y madura. Sin embargo, al cabo de un tiempo se activa la proteína CTL-4, que actúa como freno, por lo que la respuesta inmunitaria se detiene.

Intervención: Desactivar los frenos

Al bloquear la molécula CTLA-4, se permite la proliferación de los linfocitos T inmaduros. Una vez activados, estos se dirigirán hacia cualquier célula que contenga el fragmento que delate la presencia del tumor.

CTLA-4

Anticuerpo inhibidor

JEN CHRISTIANSEN

tos moleculares, denominados antígenos, que otros componentes del sistema inmunitario identifican como extraños.

Las células responsables de la segunda línea defensiva, el sistema inmunitario adaptativo, toman estos antígenos como el punto de partida para una respuesta más precisa. Si esta tiene éxito, se generará una memoria viva de los invasores microbianos que ayudará a vencerlos con mayor eficacia en el futuro. Dos tipos de células, los linfocitos T y B, protagonizan esta respuesta adaptativa. Existen varios tipos de linfocitos T, pero todos derivan de precursores formados en el timo, una glándula situada justo encima del corazón, en el centro del tórax. Los linfocitos B, por su parte, proceden de la médula ósea y dan lugar a los anticuerpos. Estas moléculas y otras producidas por los linfocitos T reconocen antígenos específicos, por lo que el sistema inmunitario únicamente atacará y destruirá las bacterias y las células infectadas que presenten en su superficie estos antígenos.

Cuando nuestras defensas funcionan de forma óptima, el sistema innato y el adaptativo cooperan para identificar y librarse de los patógenos peligrosos. Además, un subconjunto de los linfocitos T conserva a largo plazo el recuerdo molecular de la amenaza inicial, con lo que podrá neutralizarla con mayor rapidez si esta se repite en el futuro.

Por supuesto, el cáncer no es infeccioso. Aparece cuando las células del propio organismo experimentan ciertos cambios, genéticos o de otro tipo. Incluso así, el sistema inmunitario tendría que reconocer las células malignas, ya que exhiben en su superficie fragmentos moleculares anómalos que deberían parecer extraños a los linfocitos T y B. Sin embargo, por varias razones, el sistema inmunitario con frecuencia no consigue vencer el cáncer. A lo largo de los años, los intentos por reforzar su reacción han originado resultados desiguales. Las estrategias recientes, que han producido mejorías de modo más generalizado, siguen una vía diferente. Se da la circunstancia de que, a veces, los tumores se apropian de los interruptores que suelen desactivar el sistema inmunitario y reducen así su respuesta contra ellos. Los nuevos métodos tratan de surprimir esos obstáculos.

SUPERVISIÓN Y EQUILIBRIO

El medicamento experimental que salvó la vida de Shirley se ajusta a este nuevo paradigma. Surgió a raíz de las investigaciones sobre CTLA-4, una proteína presente en numerosos tipos de linfocitos T pero que solo entra en acción después de que algunos de ellos reconozcan su diana y reciban la señal de «adelante» por parte de otras moléculas. Una vez activada, CTLA-4 y otras proteínas funcionan como una serie de frenos moleculares o puntos de control que evitan que el sistema inmunitario se vuelva excesivamente destructivo.

La necesidad de estos puntos de control puede observarse en los animales que carecen de ellos. Los ratones que han sido modificados genéticamente y no poseen la proteína CTLA-4 mueren a la edad de tres o cuatro semanas. Sin nada que detenga la intensificación de la respuesta inmunitaria, los linfocitos T activados se infiltran en todos los órganos sanos del cuerpo y los destruyen por completo. Este descubrimiento, publicado en 1995, demostró que la ausencia permanente de esta única molécula podría provocar una devastadora reacción autoinmunitaria.

Ese mismo año, James Allison, por aquel entonces en la Universidad de California en Berkeley, aventuró la hipótesis de que, si se pudiese inutilizar temporalmente el freno molecular CTLA-4, el sistema inmunitario podría lanzar un ataque más vigoroso sobre las células cancerosas y los tumores se reducirían. Allison y sus colaboradores pusieron manos a la obra para comprobar esta hipótesis en ratones, a los que suministraron un anticuerpo sintético que obstaculizaba la actividad de CTLA-4.

Como era de esperar, el bloqueo de CTLA-4 dio lugar a la regresión de varios tipos de tumores (entre ellos, el cáncer de colon y el sarcoma) que habían transplantado antes a los animales. En otros ensayos, lograron reducir los melanomas de ratones después de tratarlos con el anticuerpo que inhibe CTLA-4 y con una vacuna experimental; esta se había elaborado a partir de células de melanoma alteradas para que provocaran un ataque inmunitario específico contra este tipo de cáncer.

El siguiente paso consistía en comprobar en los humanos la eficacia de la nueva estrategia, denominada inhibición de los puntos de control inmunitario. Allison recurrió a la compañía biotecnológica Medarex, que desarrolló una versión totalmente humana de un anticuerpo que impedía la acción de CTLA-4 (el fármaco se conoce hoy como ipilimumab), y comenzó los ensayos clínicos en pacientes con tumores muy avanzados que no habían respondido a otras terapias. Posteriormente, Medarex fue adquirida por Bristol-Meyers Squibb, que terminó de desarrollar el medicamento y consiguió su autorización en 2011.

Ya desde el primer experimento, algunos pacientes experimentaron una drástica regresión de sus tumores. Pero antes de tal mejoría, los primeros ensayos realizados para determinar la eficacia del tratamiento arrojaron unos resultados curiosos. No se tardó en ver que, en la inmunoterapia, los métodos habituales para conocer si un tratamiento oncológico está funcionando podían dar lugar a una idea equivocada.

PORCENTAJE DE ÉXITOS

Los oncólogos suelen estimar con bastante rapidez lo bien que un paciente está respondiendo a los tratamientos estándar. Justo antes de iniciarlos, y unas seis semanas más tarde, miden el tamaño de un tumor mediante diversas técnicas de obtención de imágenes (la TAC, la tomografía de emisión de positrones y la resonancia magnética). Si este ha menguado, pueden decidir entre continuar con el tratamiento, considerar una estrategia distinta o detener el tratamiento por completo.

En la inmunoterapia, tomar este tipo de decisiones resulta aún más complicado. Para empezar, hay que dejar transcurrir más tiempo para que el sistema inmunitario se active, de modo que no vuelve a medirse el tumor hasta doce semanas después de iniciar el tratamiento. Sin embargo, incluso considerando estas seis semanas adicionales, los resultados de los experimentos de bloqueo de CTLA-4 causaron desconcierto. En varios pacientes, la imágenes demostraron una clara recuperación; pero en otros, se observaba un crecimiento de los tumores ya existentes o, incluso, la aparición de otros nuevos. No obstante, algunos de los que presentaban las masas más grandes se sentían mejor.

Hoy tenemos dos posibles explicaciones de por qué crecen los tumores tras la inmunoterapia: o el tratamiento no está funcionando, o bien un gran número de linfocitos T y otras células inmunitarias han empezado a invadir el tumor. En otras palabras, el mayor tamaño de este podría indicar, paradójicamente, que el tratamiento está funcionando; solo tenemos que esperar un poco más para que se reduzca. Dado lo difícil que puede resultar evaluar la evolución del paciente durante la inmunoterapia, los investigadores que ensayan el ipilimumab se basan ahora en un parámetro sencillo y relevante para valorar su eficacia: la tasa global de supervivencia (el tiempo que viven los pacientes).

Los resultados de los últimos ensayos clínicos demuestran que algo más del 20 por ciento de los pacientes con melanoma metastásico tratados con ipilimumab experimentan una remisión

a largo plazo de la enfermedad y siguen vivos más de tres años después del inicio del tratamiento. Es importante destacar este avance, porque antes del desarrollo de medicamentos como el ipilimumab la esperanza media de vida en este tipo de cáncer era de entre siete y ocho meses. De hecho, algunos de los primeros receptores, como Shirley, siguen con vida más de cinco años después del tratamiento.

Mientras tanto, la investigación se ha centrado en una segunda molécula inhibidora del sistema inmunitario, PD-1, ubicada en la superficie de muchos linfocitos T. Cuando se une a determinadas moléculas, PD-1 incita la autodestrucción de la célula en la que se sitúa; se trata de un proceso normal que, como en el caso de la proteína CTLA-4, muy parecida a ella, ayuda a detener en el momento adecuado una reacción inmunitaria en marcha. Sin embargo, algunas células cancerosas han evolucionado para defenderse de este mecanismo; recubren su superficie con moléculas que engañan a las proteínas PD-1 de los linfocitos T y los induce a iniciar la secuencia de autodestrucción antes de tiempo. Como resultado, cualquier linfocito que se dirija contra una célula cancerosa recibe una señal para que, en vez de atacarla, se autodestruya. Este sorprendente ejemplo constituye una de las numerosas formas con las que los tumores desactivan el sistema inmunitario.

Media docena de compañías (Bristol-Myers Squibb, CureTech, EMD Serono, Genentech, Merck y MedImmune) ya han desarrollado anticuerpos que evitan que distintos tipos de tumores provoquen el suicidio de los linfocitos T mediado por PD-1. En ensayos clínicos recientes, estos compuestos experimentales han dado lugar a largos períodos de remisión (varios han durado años) en más del 30 por ciento de los pacientes con melanoma avanzado. Algunos de mis colegas del Centro Oncológico Conmemorativo Sloan Kettering y colaboradores de otros centros han examinado estas sustancias que inhiben la acción de PD-1 en pacientes con cierto tipo de cáncer de pulmón. Más del 20 por ciento de ellos experimentaron una remisión duradera.

Los resultados obtenidos con el cáncer de pulmón, publicados en junio de 2012, representaron un punto de inflexión en el campo de la inmunoterapia. Los médicos escépticos ya no pueden seguir rechazando esta estrategia con el argumento de que tal vez solo resulte viable en ciertos tumores, como el melanoma y el cáncer de riñón, en los que ya se sabía demostrado su eficacia. Hoy en día, se ha visto que la inmunoterapia funciona en una gama más amplia de tumores. Lo más probable es que se añada muy pronto a la quimioterapia y a la radioterapia en el tratamiento estándar de numerosos tipos de cáncer.

Como ocurre con la mayoría de los tratamientos oncológicos, estas inmunoterapias desencadenan efectos secundarios. Los pacientes que reciben medicación anti-CTLA-4 sufren reacciones inflamatorias en la piel y el intestino grueso, como consecuencia del exceso de sustancias excitadoras liberadas por las células inmunitarias. Los sarpullidos resultantes, así como los dolorosos episodios de calambres y diarrea suelen mitigarse con corticosteroides inmunodepresores como la prednisona. La terapia de inhibición de PD-1 también puede provocar estos síntomas (sobre todo en los riñones, pulmones e hígado), pero, por regla general, son menos frecuentes y graves que en la inhibición de CTLA-4. Afortunadamente, el empleo de antiinflamatorios no parece reducir la eficacia de estos fármacos contra los tumores.

La inflamación puede dar lugar a complicaciones más importantes. Durante mucho tiempo, se temía que la cascada excitadora originara reacciones autoinmunitarias a gran escala y no pudiera evitarse que el sistema inmunitario atacara y destruyera regiones cada vez más amplias de tejido normal. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en una verdadera enfermedad autoinmunitaria, estos efectos secundarios inflamatorios parecen ser transitorios y no vuelven a producirse después del tratamiento inicial.

Como los anticuerpos contra PD-1 y CTLA-4 potencian la respuesta inmunitaria contra los tumores de forma distinta, parece lógico investigar si el tratamiento conjunto con ambos fármacos resulta seguro y eficaz. En experimentos realizados en 2007 con animales que padecían cáncer de colon y melanoma, se demostró que el bloqueo conjunto con CTLA-4 y PD-1 funcionaba mejor que con cualquiera de las dos moléculas por separado. Por tanto, en 2010, nuestro grupo, en colaboración con Mario Sznol, de la Universidad de Yale, decidió llevar a cabo un pequeño estudio de seguridad con ipilimumab y nivolumab, un inhibidor de PD-1, en 53 pacientes con melanoma metastásico.

Los resultados, que presentamos el año pasado en un congreso, fueron impresionantes. En más del 50 por ciento de los pacientes tratados con dosis consideradas óptimas de ambos anticuerpos, el tamaño de sus tumores se redujo hasta más de la mitad. Estas respuestas resultan muy distintas de las observadas con cualquiera de los fármacos por separado. Juntos producían efectos secundarios más frecuentes que cuando se administraban aislados, pero podían aliviarse, igual que antes, con corticosteroides. Cabe destacar que se trata de datos preliminares obtenidos en un estudio pequeño. En la actualidad, estamos llevando a cabo una investigación más amplia con ipilimumab y nivolumab en el que intervienen más de 900 pacientes con melanoma.

Otros científicos están evaluando esta misma inmunoterapia conjunta para combatir el cáncer de pulmón, de riñón, de estómago, de mama, de cabeza y cuello y de páncreas. La estrategia podría resultar aún más eficaz si, además, se ataca directamente el tumor mediante quimioterapia o radioterapia, siempre y cuando las células cancerosas desencadenen al morir la respuesta inmunitaria innata. Por otro lado, estas intervenciones juntas permitirían la formación de linfocitos T con memoria, los cuales mantendrían una vigilancia aún más intensa contra cualquier proliferación ulterior del cáncer. Todavía queda por determinar si este tipo de inmunoterapia podría o debería combinarse con otras que se hallan en desarrollo (como las vacunas contra el cáncer) para obtener un mayor efecto.

En conjunto, creo que por fin ha llegado el momento de empezar a pensar de forma realista en remisiones a largo plazo, o incluso en una cura, porque ahora podemos combinar tratamientos estándar dirigidos contra el tumor con inmunoterapias que refuerzan las propias defensas del paciente.

PARA SABER MÁS

Cancer immunoediting: Integrating immunity's roles in cancer suppression and promotion. Robert D. Schreiber et al. en *Science*, vol. 331, págs. 1565-1570, 25 de marzo de 2011. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21436444**

Nivolumab plus ipilimumab in advanced melanoma. Jedd D. Wolchok et al. en *New England Journal of Medicine*, vol. 369, n.º 2, págs. 122-133, 11 de julio de 2013. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23724867**

EN NUESTRO ARCHIVO

Inmunoterapia contra el cáncer. Lloyd J. Old en *IyC*, noviembre de 1996.

Vacunas contra el cáncer. Eric von Hofe en *IyC*, diciembre de 2011.

El científico paciente. K. Harmon en *IyC*, octubre de 2012.

INGENIERÍA

El futuro del diseño flexible

Máquinas flexibles, de una sola pieza, podrían hacer en breve que los actuales montajes de partes rígidas parezcan antiguallas

Sridhar Kota





LOS DIAFRAGMAS de iris hechos de una sola pieza cambian de geometría por completo cuando se presiona su anillo exterior.



Sridhar Kota ocupa la cátedra Herrick de ingeniería en la Universidad de Michigan y es fundador y presidente de FlexSys, Inc.

Un día lluvioso de 1995 iba conduciendo por Ann Arbor, en Michigan, cuando me quedé absorto con los limpiaparabrisas. Por entonces era profesor adjunto de ingeniería mecánica de la Universidad de Michigan. En los años anteriores había realizado varios estudios sobre lo que en el ámbito industrial se conoce como «diseño de montaje». El objetivo de este tipo de estudio es la reducción del número de piezas de una determinada máquina, para abaratar los costes de fabricación y montaje. Durante ese trabajo me había preguntado qué sucedería si se llevase el diseño de montaje hasta el extremo. ¿Podríamos diseñar productos que no hubiese que montar?

Mientras iba al volante, me llamó la atención que el limpiaparabrisas fuese un absurdo despilfarro de trabajo de ingeniero. El armazón que sujeta la escobilla desechable tiene que ser muy flexible. Debe mantener presionada la escobilla contra el cristal mientras se mueve de un lado a otro sobre una superficie contorneada, variable. Además, ha de hacerlo de esa forma en diversos modelos de automóvil, en cada uno de los cuales el parabrisas tiene su propia geometría. ¿Nuestra respuesta a esta exigencia de flexibilidad? Un complicado sistema de barras rígidas, uniones y pivotes.

En esa época había otro asunto que centraba mi interés: el diseño elástico, o «doblegable», que busca la construcción de máquinas flexibles y resistentes con el menor número de piezas. En nuestro equipo habíamos conseguido ya construir máquinas a partir de una sola pieza de material. En 1993, junto con mis estudiantes de doctorado G. K. Ananthasuresh y Laxman Saggere, construimos una grapadora doblegable de una sola pieza, sin montaje. Pero el limpiaparabrisas me impresionó como ejemplo perfecto para una prueba. Un limpiaparabrisas de una pieza, o monoforme, eliminaría a casi todos los efectos el montaje. Si tenía éxito, el proyecto sería mucho más que un ejercicio de ingeniería minimalista. La mayor parte del coste de fabricación de un limpiaparabrisas corresponde al montaje. A nadie sorprende que la producción de estos artículos intensivos en montaje se haya trasladado desde hace tiempo a países con salarios bajos.

La empresa no fue tarea fácil. Durante las últimas dos décadas, la mayor parte de mis investigaciones se han centrado en los principios generales del diseño elástico: el desarrollo de herramientas teóricas que los ingenieros necesitan para diseñar y construir dispositivos doblegables. Pero al final diseñamos ese limpiaparabrisas. Más aún: con el diseño elástico hemos construido amplificadores de movimiento monoformes miniaturizados, alas flexibles de avión, serpientes robóticas y otras máquinas, y cada uno de estos artefactos es la expresión de un nuevo paradigma para la ingeniería, cuyo momento ha llegado ya.

MÁQUINAS VIVIENTES

Las máquinas doblegables nos son más conocidas de lo que podríamos pensar. Quizás el primer ejemplo, y el más elegante, sea el arco de flechas. Cuando el arquero tensa el arco, se almacena lentamente energía elástica que luego se libera deprisa para propulsar la flecha. Este resistente y flexible mecanismo se puede usar muchas veces, con precisión y sin fallos. Un ejemplo más moderno es el tapón de frasco de champú: un dispositivo monoforme que combina, sin una bisagra mecánica, un tapón de fácil apertura y un cuello a rosca de sellado. Otro ejemplo serían los fórceps quirúrgicos desechables, muy usados en los hospitales, suficientemente precisos para el quirófano, pero tan baratos como para tirarlos después de usarlos.

Los diseños elásticos que tienen mayor éxito se hallan en la naturaleza. Caí en la cuenta en 1995, cuando comencé a leer los trabajos de Steven Vogel, el renombrado biólogo de la Universidad Duke. En libros como *Life's devices* y *Cats' paws and catapults*, explica con maestría el funcionamiento de los diseños naturales y traza un paralelismo con los dispositivos que crea la ingeniería. Las ramas de árbol, alas de aves, patas de cangrejo y trompas de elefante son mecanismos flexibles y fuertes. Sus componentes, bien crecen unos a partir de otros, bien están unidos entre sí con interfaces resistentes y autorregenerativas. Estos sistemas naturales se doblan, deforman y flexionan gracias a su inherente elasticidad, a diferencia de los sistemas de engranajes, muelles y correderas.

Los seres humanos han acumulado milenios de experiencia en el diseño de estructuras resistentes y rígidas, como puentes y edificios. En su mayoría se construyen con materiales fuertes, rígidos. Si las tensiones son demasiado altas, simplemente se añade más material para distribuir la carga o aumentar la rigidez. En este paradigma, la rigidez es buena y la flexibilidad, mala. De hecho, con estructuras rígidas, la comba, el alabeo (deformarse o ceder bajo tensión mecánica), solo es deseable si el diseño está pensado para aguantar un terremoto.

El diseño doblegable, por el contrario, aprovecha las combas. Si la tensión en un punto de flexión es demasiado alta, se reduce su espesor, no se lo hace más grueso, porque la función de una estructura doblegable es aprovechar la elasticidad como una función mecánica o cinemática.

En el caso del tapón del frasco de champú, la tensión se concentra en la fina zona de polímero que une la tapa a la base. El fórceps desechable tiene un diseño muy parecido. Cuando las tensiones se concentran en una zona delgada concreta, a la flexión se la llama «doblegamiento concentrado» o «flexibilidad concentrada». Los investigadores llevan estudiando la flexibilidad concentrada desde la década de los cincuenta del siglo xx. En fecha más reciente, Ashok Midha, de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Missouri, Larry Howell, de la Universidad Brigham Young, Shorya Awtar, de la Universidad de Michigan, y Martin L. Culpepper, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han realizado investigaciones excelentes sobre este tema

EN SÍNTESIS

Las máquinas diseñadas por el ser humano adquieren flexibilidad gracias a sistemas complejos, con frecuencia ineficientes, de partes rígidas. Resistencia y flexibilidad a menudo son incompatibles.

El diseño elástico, o doblegable, es una estrategia en ingeniería que aprovecha la flexibilidad para distribuir cargas en dispositivos con adaptación de forma que constan del menor número posible de piezas.

Podría conducir a nuevas máquinas, como alas de avión que cambien de forma y robots con forma de serpiente, así como a modos de aumentar la duración y el rendimiento de toda clase de dispositivos.

FOTOGRAFÍAS DE GREG RUFFING







CON EL DISEÑO ELÁSTICO, superficies flexibles con adaptación de forma pueden sustituir a los alerones de alas rígidas (*1*), se moldean armazones de limpiaparabrisas a partir de una sola pieza (*2*), y un solo trozo de plástico realiza el trabajo de las casi dos docenas de piezas de una grapadora estándar (*3*).

y presentado aplicaciones de la flexibilidad concentrada para instrumentos de precisión y dispositivos de nanocolocación.

El arco de flechas, por el contrario, no tiene esta zona de flexión localizada: presenta un «doblegamiento distribuido» o «flexibilidad distribuida» a lo largo de toda su longitud. La flexibilidad distribuida es esencial para la construcción de máquinas flexibles que tengan que realizar un trabajo pesado (por ejemplo, las alas que deben mantener aviones en el aire o los motores que han de funcionar durante millones de ciclos). Cuando empecé a trabajar en este campo, no pude encontrar fundamentos teóricos o métodos generales para el diseño de máquinas con flexibilidad distribuida. Naturalmente, esa fue el área en que centré mis esfuerzos, y en la que aún sigo interesado.

PARA EMPEZAR, A PEQUEÑA ESCALA

Comencé a trabajar en máquinas flexibles y de una pieza no porque me parecieran una novedad fascinante, sino porque, en ciertas aplicaciones, el diseño sin montaje es una necesidad. Empecé mi carrera profesional estudiando sistemas mecánicos grandes, las transmisiones de automóviles entre ellos. A principios de los años noventa, sin embargo, me encontré diseñando máquinas verdaderamente diminutas, los sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés). Se debió más que nada a las circunstancias de esa época. Las compañías de telecomunicaciones empezaban a desarrollar interruptores ópticos para redes de fibra óptica; necesitaban motores diminutos que cambiasen con gran rapidez el ángulo de los espejos que mandaban una señal óptica por una dirección o por otra. Poco después de leer a Vogel y de que me dedicara a estudiar el diseño elástico, me embarqué en un proyecto con Steven Rodgers y su equipo de la división de microsistemas de los Laboratorios Nacionales Sandia, donde un diseño monoforme parecía perfecto.

Sandia necesitaba construir un motor lineal con suficiente movimiento de salida para desempeñar su trabajo: al menos 10 micrómetros. Pero las condiciones a que está sujeta la fabricación de los motores electrostáticos restringen su movimiento a dos micrómetros. Sabía que no podía limitarme a miniaturizar, digamos, una transmisión por engranaje. Aunque hubiese podido encontrar a alguien con pulso lo bastante firme para el montaje de engranajes, bisagras y ejes con dimensiones de uno a dos micrómetros, la máquina resultante habría sido demasiado chapucera para la ingeniería moderna. A la escala de los MEMS, una máquina con una tolerancia de una décima de micrómetro es casi tan útil como un juego de construcción para niños. Además, los dispositivos MEMS se fabrican en lotes; se parece a lo que se hace con los circuitos integrados: decenas de miles en una superficie del tamaño de la uña del pulgar. Por estas razones, diseñé un amplificador de movimiento monoforme que generaba un movimiento de salida de 20 micrómetros cuando se integraba con el motor electrostático.

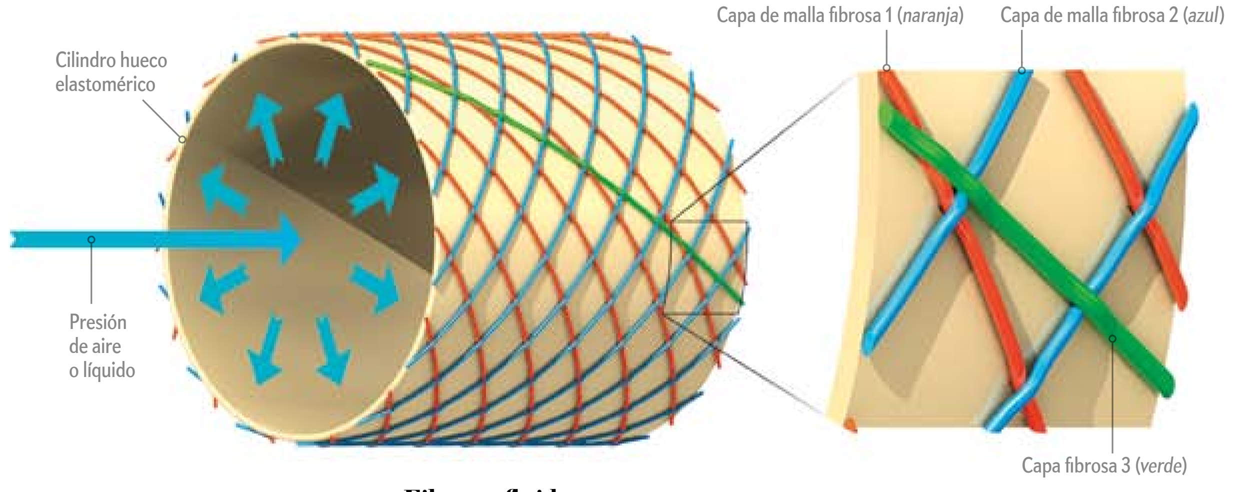
En 1998 teníamos en funcionamiento el motor y el amplificador. Recuerdo claramente cómo me maravillaba el diminuto dispositivo en el laboratorio. Llevaba funcionando más de 10.000 millones de ciclos y no parecía tener fin. Pero lo que más me impresionaba era el amplificador de movimiento: entero, con toda su complejidad y flexibilidad, no tenía sino una sola pieza, de silicio policristalino.

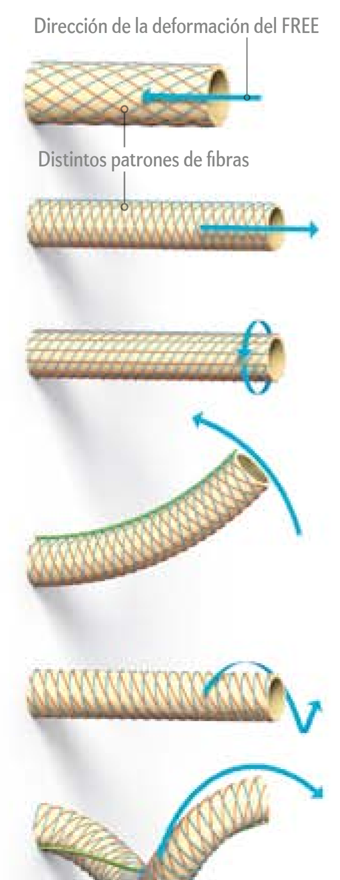
AEROPLANOS FLEXIBLES

Entre todas las razones por las que escogí el estudio del diseño doblegable, la de más peso para mí fue la adaptación de forma (*morphing*). La capacidad de alterar la geometría de una estructura en tiempo real permite que las máquinas naturales funcionen con la máxima eficiencia. Compárese esta adaptabilidad con las geometrías fijas del mundo de la ingeniería: transmisiones de automóviles, alas de aviones, motores, compresores, ventiladores, etcétera. Estas máquinas, como casi cualquiera de diseño convencional, alcanzan su mayor eficiencia bajo condiciones muy específicas. El resto del tiempo trabajan por debajo de sus posibilidades. Un avión experimenta diversas condiciones de vuelo cuando va de A a B: la altitud, la velocidad e incluso el peso van cambiando a medida que se consume el combustible,

Cómo construir un robot serpiente

Para gusanos, pulpos y otros animales con cuerpo blando, la carencia de esqueleto rígido no es un inconveniente: se desplazan gracias a la elastofluídica. Sus cuerpos son tubos musculares repletos de fibras que rodean una cavidad presurizada llena de líquido. Las fibras actúan como antagonistas de la presión del fluido, generada por la contracción muscular; la orientación de las fibras determina el alcance del movimiento. Ingenieros en la Universidad de Michigan están desarrollando «robots» basados en este mismo principio. Entre las posibles aplicaciones se encontrarían dispositivos ortésicos que ayuden al movimiento de miembros y robots capaces de manejar objetos delicados y que trabajen sin riesgo junto a seres humanos.





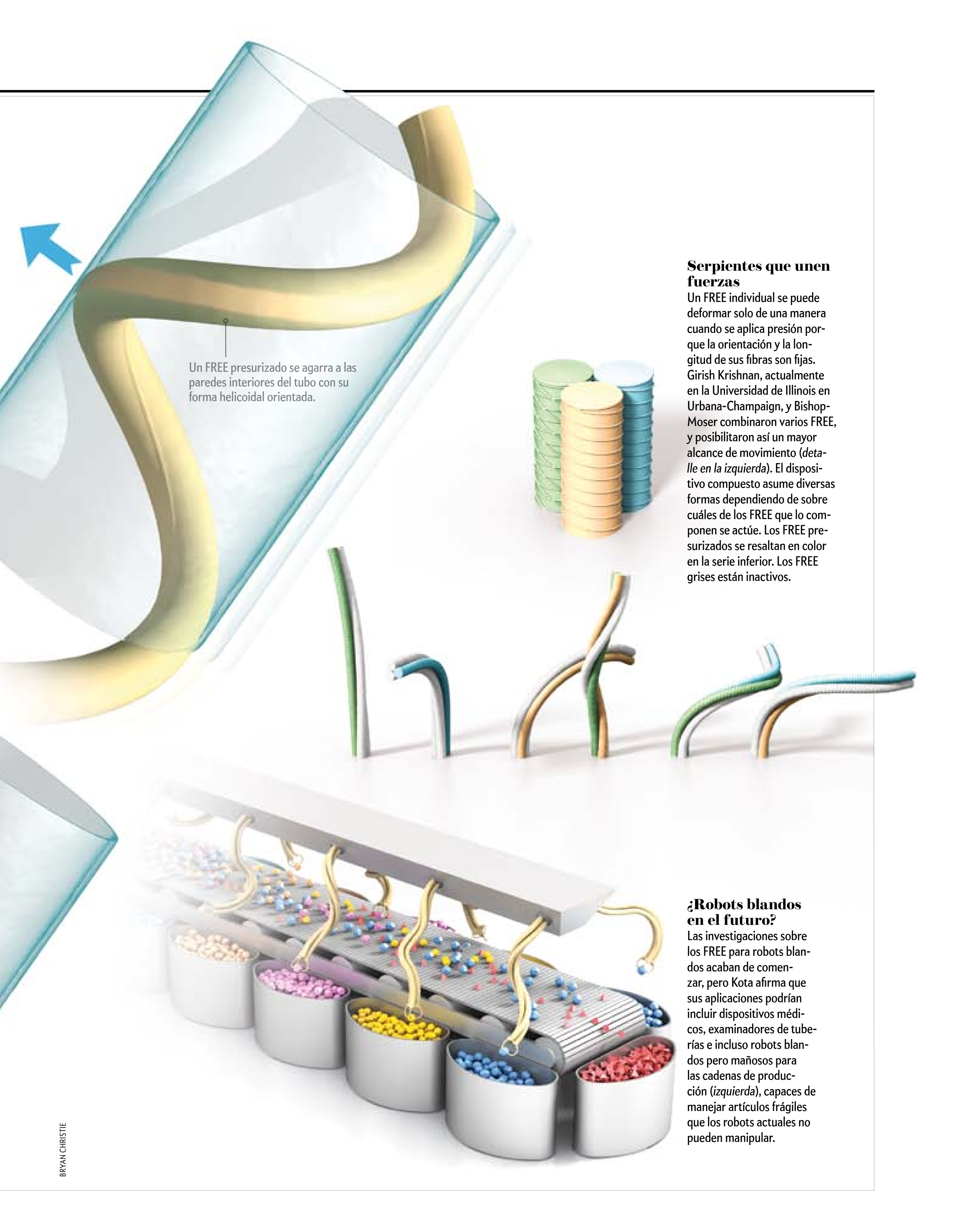
Fibras y fluido

La mayoría de los intentos previos de diseñar robots serpenteantes usaban cuerpos segmentados, largas cadenas de componentes accionados individualmente. En lugar de este método, Kota y Joshua Bishop-Moser, de la Universidad de Michigan, se valieron de un fluido presurizado dentro de un envoltorio elastomérico reforzado con fibras (FREE, por sus siglas en inglés). FREE es un cilindro hueco de polímero elástico reforzado con dos o tres capas de una malla fibrosa (*arriba*). Los ángulos en que las fibras se enrollan en espiral alrededor del cilindro determinan cómo cambia de forma el dispositivo cuando se presuriza el fluido del interior del cilindro (*izquierda*).

Serpiente que se agarra a tubos

Para probar la idea, Bishop-Moser construyó un «robot» que agarra tubos. Lo hizo de un FREE consistente en un tubo elastomérico envuelto con fibras naturales y relleno de aire (*abajo a la derecha*). Cuando se presuriza el aire, el FREE se deforma helicoidalmente y empuja contra el interior (o se envuelve alrededor del exterior) del tubo (*arriba a la derecha*). Teóricamente, una serpiente que agarra tubos construida según este diseño podría sostener objetos de un peso cien veces mayor.

FREE inactivo (sin presión)



Serpientes que unen fuerzas

Un FREE individual se puede deformar solo de una manera cuando se aplica presión porque la orientación y la longitud de sus fibras son fijas. Girish Krishnan, actualmente en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y Bishop-Moser combinaron varios FREE, y posibilitaron así un mayor alcance de movimiento (*detalle en la izquierda*). El dispositivo compuesto asume diversas formas dependiendo de sobre cuáles de los FREE que lo componen se actúe. Los FREE presurizados se resaltan en color en la serie inferior. Los FREE grises están inactivos.

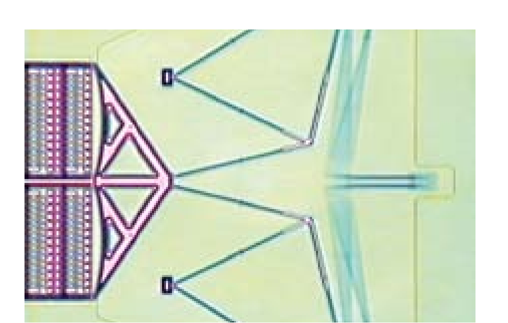
¿Robots blandos en el futuro?

Las investigaciones sobre los FREE para robots blandos acaban de comenzar, pero Kota afirma que sus aplicaciones podrían incluir dispositivos médicos, examinadores de tuberías e incluso robots blandos pero mañosos para las cadenas de producción (*izquierda*), capaces de manejar artículos frágiles que los robots actuales no pueden manipular.

lo que significa que casi constantemente está funcionando con un rendimiento menor del que podría alcanzar. Las aves, por el contrario, despegan, aterrizan, planean y se lanzan en picado ajustando sin esfuerzo la configuración o la forma de sus alas según las necesidades.

Volvamos a mediados de los años noventa. Me preguntaba por entonces si alguien había intentado alguna vez cambiar la forma del ala (la curvatura de la superficie) durante el vuelo, para mejorar su rendimiento. Quedé sorprendido al descubrir que los hermanos Wright habían abierto ese camino al desarrollar en su aeroplano original un tipo distinto de adaptación de forma del ala, la torsión. Luego supe que cambiar la curvatura del ala para que un avión moderno se acople a diferentes condiciones de vuelo había sido un objetivo esquivo durante décadas. Así que una noche me senté ante mi mesa de comedor y me puse a trabajar en un diseño.

Tras unos meses de estudio, me topé con un pequeño y encomiástico texto en un periódico. Hablaba de unas investigaciones sobre alas flexibles realizadas a finales de los años ochenta en la Base Wright-Patterson de la Fuerza Aérea de Estados Unidos, en Ohio. Los ingenieros del proyecto denominaban la meta que perseguían «ala adaptable al cometido» (MAW, por sus siglas en inglés). Aunque no sabía nada sobre el resultado de su trabajo, me hizo entender que un ala con adaptación de forma no era una idea descabellada, así que me puse en contacto con los investigadores para preguntarles si les interesaría revisar mi diseño. Su reacción fue apabullante.



EN EL CASO de las máquinas diminutas, como este amplificador de movimiento microelectromecánico, se requiere el diseño en una sola pieza para que la fabricación sea posible.

Me explicaron que la mayor parte, si no la totalidad, de los intentos anteriores de crear un ala con adaptación de forma habían utilizado estructuras rígidas, mecanismos complejos y pesados, con muchos potentes accionadores que hacían que la estructura del ala se flexionase para adoptar diferentes geometrías. En una ocasión, por ejemplo, los ingenieros modificaron el ala de un caza F-111 con paneles flexibles. Su ala adaptable mostró una aerodinámica prometedora, pero la estructura se juzgó demasiado compleja y pesada para su aplicación práctica.

No me sorprendió. El diseño de un ala práctica de geometría variable implica satisfacer muchos requisitos contradictorios. El ala debe ser ligera, pero fuerte para soportar miles de kilogramos de cargas aerodinámicas, fiable para trabajar durante cientos de miles de horas, sencilla de fabricación y mantenimiento, y duradera para soportar la exposición química, la radiación ultravioleta y los cambios considerables de temperatura. Las herramientas conceptuales e informáticas de esa época no estaban orientadas hacia el diseño de máquinas monoformes, y mucho menos el de unas que cumpliesen tantas exigencias contradictorias.

El diseño de ala flexible que remití a Wright-Patterson aprovechaba la elasticidad de los componentes de prueba, que eran materiales de categoría aeroespacial del todo ordinarios. El ala tenía una estructura interna diseñada para que se deformase fácilmente cuando un motor interno, compacto, aplicase una fuerza, pero se mantuviese rígida cuando se aplicaran fuerzas intensas y exteriores en la prueba del túnel de viento. Al igual que yo, los ingenieros responsables de Wright-Patterson estaban entusiasmados con el diseño. Hasta tal punto lo estaba yo que en diciembre de 2000 fundé una empresa, FlexSys, para desarrollar aplicaciones prácticas del diseño doblegable.

A los seis años, después de mucho desarrollo y varias pruebas exitosas en el túnel de viento, logramos adosar un prototipo de ala flexible a la parte inferior de un avión White Knight de Scaled Composites para unas pruebas de vuelo en el desierto de Mojave. El ala se instaló debajo del cuerpo del reactor y disponía de toda la instrumentación necesaria para medir la sustentación y la resistencia aerodinámica. Su coeficiente de sustentación varió de 0,1 a 1,1 sin que aumentase la resistencia aerodinámica, lo que se traduce en un aumento del rendimiento del combustible de hasta un 12 por ciento en un ala diseñada para aprovechar de la mejor manera el nuevo alerón flexible. (Con alerones flexibles adaptados a las alas existentes se obtendría un aumento del 4 por ciento o más.) Considerando que las líneas aéreas estadounidenses consumen al año unos 61.000 millones de litros de combustible de aviación, estos porcentajes que pueden parecer pequeños tendrían su importancia. El ala era además más sencilla, sin partes móviles en el mecanismo de adaptación de forma (y, por tanto, más fiable) y tendría una mejor relación peso-potencia.

El examen real para las alas de avión con forma adaptable llegará cuando las superficies de control flexibles sustituyan totalmente a los alerones al uso. Estamos dando los últimos toques a ese proyecto. Con la colaboración de los laboratorios de investigación de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, FlexSys diseñó y construyó una superficie continua que se dobla (cambia de curvatura) y se torsiona en la dirección de su envergadura para maximizar el rendimiento aerodinámico, y que sustituye a los alerones generadores de resistencia aerodinámica del borde de salida, o posterior, del ala. Hemos adaptado a un reactor privado Gulfstream Aerospace GIII nuestras superficies FlexFoil con control de geometría variable, que sustituyen a los alerones corrientes. Además de un ahorro notable de combustible, se espera que nuestro diseño reduzca el ruido del avión: según la NASA, la mayor parte del ruido en el aterrizaje de un avión está causado por los vórtices generados en los bordes agudos y los espacios de separación entre los alerones del borde de salida desplegados y las partes fijas del ala. Para eliminar estos espacios hemos incorporado superficies de transición.

ARRASTRARSE Y REPTAR

En los últimos años, junto con mis estudiantes de doctorado Joshua Bishop-Moser y Girish Krishnan, hemos empezado a realizar investigaciones de diseño elástico tomando como modelo las máquinas naturales más flexibles de la Tierra: los animales sin esqueletos evidentes. Entre estas formas de vida, las que más parecen de otro mundo, como los anélidos y los nematodos, ejecutan sus actividades de modos que ahora solo estamos empezando a conocer. Ejemplos más familiares, los pulpos por ejemplo, proporcionan un ideal que los ingenieros especialistas en elasticidad se esfuerzan en alcanzar.

Los animales de cuerpo blando, como los gusanos y los pulpos, carecen de cualquier estructura esquelética aparente, y a pesar

de ello se mueven con vigor y elegancia. En la mayor parte de los casos, lo consiguen mediante la elastofluídica. Desde el punto de vista de la ingeniería, sus cuerpos son hidrostatos: una disposición de fibras de tejido conjuntivo y músculos rodea una cavidad presurizada y rellena de líquido. Un estudio de la anatomía de estas criaturas revela, por lo común, una disposición helicoidal de fibras y músculos, entrecruzada, alrededor de los órganos internos, que ocupan el núcleo relleno de líquido. Las fibras helicoidales entrecruzadas sirven como antagonistas de la presión del fluido generada por la contracción del músculo; la orientación de las fibras determina el alcance del movimiento.

Existen muchas variantes de esqueletos hidrostáticos en todo el mundo animal. Los brazos de un pulpo son hidrostatos musculares. Una trompa de elefante emplea fibras musculares densamente empaquetadas alrededor de un cuerpo hidrostático. La piel de una anguila, reforzada por fibras, actúa como un tendón externo, con el que crea una enérgica fuerza de propulsión natatoria.

Nuestras investigaciones sobre la elastofluídica están todavía en sus primeras etapas, pero nuestra hipótesis es que estos elementos podrían servir como componentes para construir «robots blandos» y otros dispositivos que interaccionen sin riesgo con el entorno y los seres humanos. Las primeras aplicaciones, sin embargo, serán con gran probabilidad en el campo de las ortesis. Por ejemplo, los pacientes que sufran de una contractura en un brazo causada por el endurecimiento de un músculo o por la deformidad o rigidez de una articulación podrían usar un dispositivo ortésico flexible que obligue suavemente al brazo a volver a su posición funcional en las actividades cotidianas.



LOS HIDROSTATOS que se agarran a tubos, como este dispositivo para probar la viabilidad de la idea, con el tiempo podrían dar lugar a robots blandos serpenteantes.

DOBLEGARSE SE VALORA

Con la ayuda de talentosos doctorandos en el Laboratorio de Diseño de Sistemas Doblegables de la Universidad de Michigan, la investigación básica que comenzamos en 1992 se ha convertido en una veta de conocimientos útiles y métodos sistemáticos de diseño. Esos estudiantes, demasiado numerosos para mencionarlos aquí, están trabajando ahora por su cuenta en diseño elástico en la Universidad del Estado de Pensilvania, la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, la Universidad de Illinois en Chicago, la Universidad Bucknell, el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, los Laboratorios Nacionales Sandia, el Laboratorio de Investigación de la Fuerza Aérea, KLA-Tencor, Ford Motor Company, FlexSys, Raytheon e Intel. Gracias a los brillantes ingenieros de FlexSys, algunos de los dispositivos que hemos desarrollado durante estos años están cerca de la comercialización. Hemos terminado las pruebas de desgaste por la acción de los elementos de nuestro armazón de limpiaparabrisas monoforme y finalizado el molde de producción; están en marcha las negociaciones con fabricantes de automóviles y proveedores para su utilización como limpiaparabrisas trasero. El limpiaparabrisas monoforme está hecho de un polímero termoplástico relleno de vidrio y trabaja perfectamente tanto en condiciones gélidas como calurosas. No se partirá o torcerá ni siquiera cuando tenga que quebrar hielo o nieve. Cuando salga al mercado, debería ser mucho más duradero y fiable, y de fabricación más barata que cualquier dispositivo con el que compita.

Nuestras alas de avión flexibles ya están técnicamente listas para el uso comercial. Con sustituir el 15 por ciento exterior de un alerón existente con un subalerón de geometría variable para la configuración de crucero, se podría ahorrar un 5 por ciento en combustible de aviación. La sustitución del alerón completo con un FlexFoil sin partes separables produce alrededor de un 12 por ciento de ahorro de combustible en los nuevos diseños. Podrían transcurrir otros dos años antes de que obtengamos la certificación de la Administración Federal de Aviación estadounidense, pero creemos que es probable que, cuando la industria adquiera confianza en las alas flexibles, estas sustituyan totalmente a los alerones con bisagra en los futuros aviones de ala fija de todos los tipos.

Abundan los casos en los sectores de la automoción, la medicina, los electrodomésticos y los productos de consumo donde el diseño elástico podría reducir drásticamente el número de piezas de un dispositivo cualquiera. La mayor dificultad es darlo a conocer a los diseñadores industriales. El uso generalizado de productos nuevos, como nuestro limpiaparabrisas flexible, debería ayudar a respaldar esa forma de diseño. Incluso entonces, no obstante, quedará un obstáculo: en estos momentos no se dispone de herramientas informáticas, fáciles de usar, para investigarlo. Con un contrato de la Fundación Nacional para la Ciencia, FlexSys está desarrollando programas informáticos para avanzar en esta línea.

Se tardarán varios años antes de que el diseño elástico alcance algún tipo de masa crítica, pero percibimos que su adopción generalizada es inevitable. La resistencia, precisión, versatilidad y eficiencia que ofrece la elasticidad darán a los ingenieros de muchos campos un conjunto completamente nuevo de herramientas con las que trabajar, y pronto todos empezaremos a apreciar la fuerza de ser flexible.

PARA SABER MÁS

Better bent than broken. Steven Vogel en *Discover*, págs. 62-67, mayo de 1995.

EN NUESTRO ARCHIVO

Organismos que captan corrientes. Steven Vogel en *IyC*, octubre de 1978.
Vuelo con alas flexibles. Steven Ashley en *IyC*, enero de 2004.
Cómo construir un robot pulpo. Katherine Harmon en *IyC*, abril de 2014.

HISTORIA DE LA FÍSICA

De la superconductividad al bosón de Higgs

Buena parte de las ideas que condujeron al mecanismo de Higgs se originaron en la física de la materia condensada. Su historia ayuda a entender desde otra perspectiva una de las piedras angulares de la física de partículas

Miguel Á. Vázquez-Mozo

SERIE

LA FÍSICA DE PARTÍCULAS ANTES Y DESPUÉS DEL BOSÓN DE HIGGS

1. **El problema de la supersimetría**
   Joseph Lykken y Maria Spiropulu
   Junio de 2014

2. **Los orígenes históricos del mecanismo de Higgs**
   Miguel Á. Vázquez-Mozo
   Julio de 2014

3. **Más allá del modelo estándar: Una visión fenomenológica**
   Entrevista con Álvaro de Rújula
   Agosto de 2014

4. **Física de partículas y cosmología: Perspectivas teóricas**
   Entrevista con Luis Álvarez-Gaumé
   Septiembre de 2014

EN SÍNTESIS

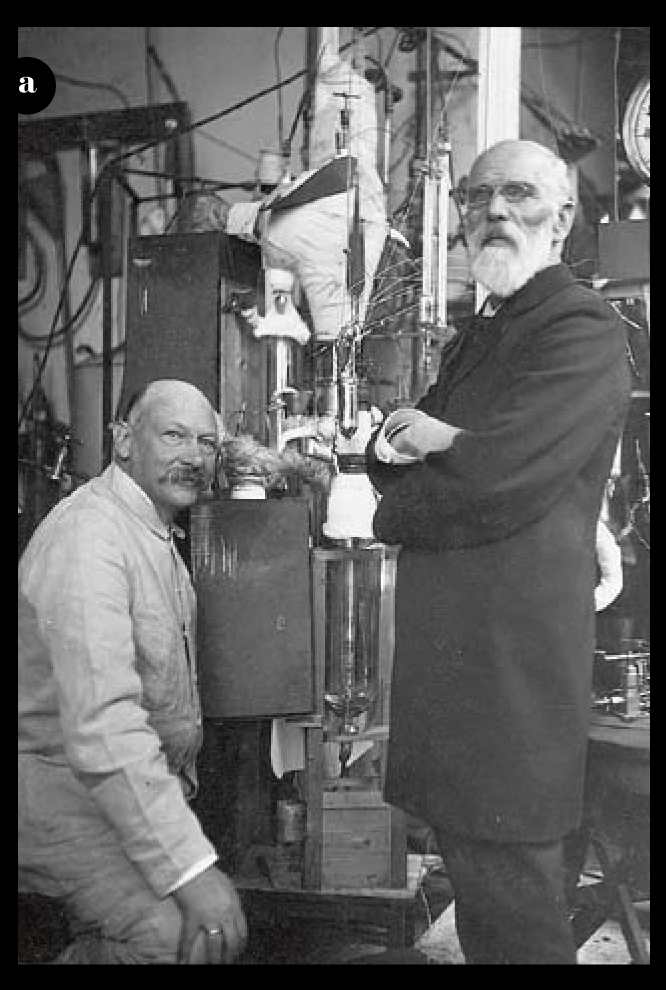
El hallazgo del bosón de Higgs, descubierto en el CERN hace ahora dos años, confirmó el mecanismo escogido por la naturaleza para dotar de masa a las partículas elementales.

Dicho mecanismo se basa en una idea clave en física: la ruptura espontánea de simetría. Su origen se encuentra estrechamente ligado a los esfuerzos por entender la superconductividad.

Philip Anderson desempeñó un papel crucial a la hora de estudiar tales ideas en materia condensada. En física de partículas destacaron los trabajos de Yoichiro Nambu y Jeffrey Goldstone.

Algunas de las claves del mecanismo de Higgs pueden retrotraerse a los trabajos de Ernst Stueckelberg. En 1938, el físico formuló una versión de la electrodinámica con fotones masivos.











DE LOS MATERIALES A LAS MATEMÁTICAS: Heike Kamerlingh-Onnes (*a*, *izquierda*), Philip Anderson (*b*), Yoichiro Nambu (*c*) y Jeffrey Goldstone (*d*).

Miguel Ángel Vázquez-Mozo es físico teórico de la Universidad de Salamanca y miembro del Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, de la misma universidad. Investiga en teoría cuántica de campos, teoría de cuerdas y cosmología. Desde hace varios años imparte también clases de historia de las ideas físicas en la facultad de filosofía.



En 1913, Heike Kamerlingh-Onnes, el descubridor de la superconductividad, especulaba con la posibilidad de usar bobinas superconductoras para producir campos magnéticos «mucho más intensos que los obtenidos con los electroimanes más potentes». Casi un siglo después, dicha técnica se aplicaría en la construcción del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN y desempeñaría con ello un papel fundamental en el hallazgo del bosón de Higgs, descubierto hace ahora dos años.

Sin embargo, la relación entre la superconductividad y el bosón de Higgs va mucho más allá del uso tecnológico de la primera en los aceleradores de partículas. El proceso intelectual que condujo a los trabajos de Robert Brout, François Englert y Peter Higgs se vio muy influido por los intentos para entender la superconductividad. Repasar aquellos avances no solo reviste un genuino interés histórico, sino que nos brinda un prisma único para analizar una de las nociones clave de la física de partículas moderna.

En abril de 1911, en su laboratorio de la Universidad de Leiden, Kamerlingh-Onnes había observado que la resistencia eléctrica de un cable de mercurio desaparecía casi por completo cuando su temperatura disminuía por debajo de 4,2 grados Kelvin. Había descubierto la superconductividad: el fenómeno por el que algunos materiales dejan de oponer resistencia al paso de la corriente eléctrica cuando se enfrían por debajo de cierta temperatura crítica.

El conocimiento de las propiedades físicas de los superconductores fue avanzando gradualmente en las décadas que siguieron. Uno de los hitos en ese proceso tuvo lugar en 1933. Aquel año, en el Instituto Físico-Técnico de Berlín, Walther Meissner y Robert Ochsenfeld observaron que, al colocar un superconductor en un campo magnético externo, este penetraba en el material si la temperatura era superior a la crítica. Sin embargo, por debajo de dicha temperatura, el campo magnético era «expulsado» del seno de la muestra. Este efecto, responsable de fenómenos como la levitación magnética, resulta tan fundamental que, con el tiempo, ha sido reconocido como la señal característica de la fase superconductora de un material.

Otro resultado clave llegó en 1953. Al estudiar experimentalmente las propiedades termodinámicas de diversos superconductores, Bruce Goodman, de los Laboratorios Mond de la Real Sociedad en Cambridge, observó que, una vez alcanzada la fase superconductora, la energía necesaria para excitar un electrón por encima del estado fundamental (la configuración de mínima energía) no podía ser arbitrariamente pequeña. Debía sobrepasar cierto umbral mínimo, cuyo valor dependía de la temperatura crítica del material.

No obstante, y tras casi medio siglo de estudio, el problema de explicar en términos cuánticos por qué ciertos materiales se tornaban superconductores a bajas temperaturas permanecía abierto. En 1957, John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer, de la Universidad de Illinois, hallaron una elegante descripción microscópica del fenómeno. Su idea se basaba en el hecho de que los electrones de un material pueden interaccionar entre sí intercambiando fonones, los cuantos de vibración de la red cristalina. Bajo ciertas condiciones, esa interacción genera estados ligados de dos electrones, llamados pares de Cooper. Aunque los electrones son fermiones (partículas de espín semientero), cada par de Cooper se comporta como un bosón; es decir, como una partícula de espín entero. Los bosones no cumplen el principio de exclusión de Pauli, por lo que un número indefinido de ellos puede «condensar» en un mismo estado cuántico, algo imposible para los electrones desapareados. Cuando los pares de Cooper condensan en un estado de mínima energía, el material se torna superconductor.

EL PROBLEMA DE LA INVARIANCIA GAUGE

La teoría BCS, así llamada en honor a sus autores, permitía dar cuenta de gran parte de la fenomenología de la superconductividad. En particular, explicaba tanto el efecto Meissner-Ochsenfeld como la existencia de una energía umbral de excitación. También predecía otros efectos que pronto fueron confirmados. Sin embargo, aunque gozó de muy buena acogida entre los físicos experimentales, los teóricos no se mostraron tan entusiastas. Había un aspecto que era percibido como muy poco satisfactorio: la descripción del efecto Meissner-Ochsenfeld no era invariante bajo las transformaciones gauge del electromagnetismo.

La invariancia gauge constituye una propiedad fundamental de las ecuaciones básicas del electromagnetismo, tanto en su versión clásica como en su formulación cuántica. Hace referencia a cierta libertad que existe a la hora de «etiquetar» ma-

temáticamente los grados de libertad que aparecen en dichas ecuaciones. Decimos que una teoría es invariante gauge cuando sus predicciones físicas no dependen de cómo elijamos tales etiquetas. Esta propiedad resulta fundamental para eliminar aquellos grados de libertad que no son físicos. En el caso del electromagnetismo, ello garantiza que la teoría describe un fotón sin masa y con solo dos polarizaciones independientes. La invariancia gauge se encuentra asociada, además, a la ley de conservación de la carga eléctrica.

En la teoría BCS, el problema aparece porque el estado fundamental del superconductor no es invariante gauge. La razón se debe a que la configuración de mínima energía queda descrita por una superposición cuántica de estados con diferente número de electrones y, por tanto, con distinto valor de la carga eléctrica. Como consecuencia, el estado fundamental no tiene asignada una carga eléctrica bien definida.

En una serie de artículos publicados a lo largo de 1958, Philip Anderson, por entonces en los Laboratorios Bell, halló la clave para resolver el problema. La formulación original de la teoría BCS solo consideraba aquellas configuraciones en las que un pequeño número de electrones se encontraban excitados por encima del estado fundamental. Anderson demostró que la invariancia gauge quedaba restaurada si, junto a dichos estados, se incluían ciertas excitaciones colectivas que involucraban un número macroscópico de electrones.

Sin embargo, la adición de tales estados colectivos resultaba potencialmente peligrosa. Sus energías de excitación eran arbitrariamente pequeñas, por lo que la teoría perdía su capacidad para explicar la existencia de una energía umbral en las excitaciones del superconductor. Anderson solucionó el problema incluyendo la interacción electrostática de largo alcance entre los electrones. Al hacerlo, los modos colectivos adquirían una energía de excitación mínima.

EL CONTAGIO A LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

La cuestión de la invariancia gauge en la teoría BCS atrajo la atención de Yoichiro Nambu, físico de partículas de la Universidad de Chicago que, en 1960, publicó un trabajo que confirmaba los resultados de Anderson con métodos de teoría cuántica de campos. Su análisis preservaba en todo momento la invariancia gauge y, además, clarificaba por qué los modos colectivos resolvían los problemas de la teoría BCS: la falta de invariancia gauge del estado fundamental quedaba compensada por las propiedades de transformación gauge de dichos estados colectivos. Gracias a ello, la teoría completa se tornaba invariante gauge.

En palabras de Anderson, Nambu fue quien presentó la superconductividad a la comunidad de físicos de partículas. El mismo año en que publicó su artículo sobre la superconductividad, Nambu formuló un modelo sobre los nucleones (protones y neutrones) inspirado por la teoría BCS. Dicho modelo, que más tarde desarrollaría en colaboración con Giovanni Jona-Lasinio, por aquella época también en la Universidad de Chicago, estableció una correspondencia entre ambos problemas que, a la postre, resultaría clave en la historia que nos ocupa.

En primer lugar, la masa de una partícula constituía el análogo de la energía umbral de excitación en un superconductor. Para entender por qué, pensemos en un fotón. Cuando se emite una partícula de luz, su energía puede ser tan pequeña como deseemos: basta con que su longitud de onda sea lo suficientemente grande. Ello se debe a que el fotón carece de masa. Sin embargo, si una partícula posee una masa m, su energía nunca podrá ser menor que la que tiene en reposo, dada por la famosa ecuación $E = mc^2$. Así pues, la masa de una partícula determina la energía mínima necesaria para emitirla. En un sólido, ello resulta equivalente a la energía umbral de excitación.

Por otro lado, las transformaciones gauge de la teoría BCS correspondían, en la teoría de Nambu, a las transformaciones quirales de los nucleones. Las partículas de espín 1/2, como los protones, neutrones o electrones, poseen una propiedad llamada quiralidad, en términos de la cual pueden clasificarse en «dextrógiras» y «levógiras» (un atributo relacionado con los dos estados de espín de la partícula). Las transformaciones quirales son aquellas que asignan cierta etiqueta matemática a las partículas dextrógiras y una etiqueta opuesta a las levógiras.

Al igual que la invariancia gauge se encuentra asociada a la conservación de la carga eléctrica, la invariancia bajo transformaciones quirales se relaciona con la conservación del número de partículas dextrógiras menos el de partículas levógiras. Sin embargo, las partículas con masa no conservan la quiralidad: un neutrón inicialmente dextrógiro se convertirá en uno levógiro, y viceversa. Ello se debe a que, en realidad, una partícula masiva de espín 1/2 queda descrita por una superposición cuántica de una componente dextrógira y otra levógira.

Con su modelo sobre los nucleones, Nambu intentaba que la masa de protones y neutrones no fuese un ingrediente a priori de la teoría, sino una consecuencia natural de ella, tal y como ocurría en la teoría BCS con la energía umbral de excitación de un superconductor. A tal fin, formuló una teoría de campos que describía partículas de espín 1/2 y que resultaba invariante bajo transformaciones quirales. Dicha teoría contaba, además, con una propiedad esencial: poseía un conjunto continuo de «vacíos»; es decir, todo un abanico de configuraciones de mínima energía.

La simetría quiral implicaba que, en sus ecuaciones básicas, el modelo de Nambu no podía incluir explícitamente ningún término de masa para las partículas. No obstante, dicha simetría no era manifiesta en ninguno de los vacíos posibles. Dado que los nucleones se identificaban con las excitaciones sobre el vacío «escogido» por la teoría, podían adquirir masa sin comprometer por ello la simetría de la teoría completa. Además, como subproducto aparecía un bosón de espín 0 y sin masa.

La situación en la cual el estado fundamental de un sistema goza de menos simetrías que la teoría completa recibe el nombre de ruptura espontánea de simetría. Un ejemplo sencillo nos lo proporciona un ferroimán. A temperaturas elevadas no hay imantación, por lo que el sólido es simétrico (no presenta ninguna dirección privilegiada). Sin embargo, cuando la temperatura disminuye por debajo de cierto valor, la muestra se imanta de forma espontánea y aparece una dirección especial: la que une los polos norte y sur del imán.

Desde un punto de vista microscópico, ello se debe a que los posibles estados de mínima energía corresponden a aquellas configuraciones en las que los dipolos magnéticos de los átomos

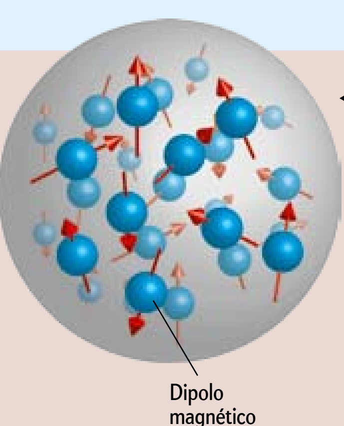
En palabras de Anderson, Nambu fue quien presentó la superconductividad a la comunidad de físicos de partículas

Imanes, superconductores y partículas elementales

La descripción de la superconductividad y el modelo estándar de la física de partículas comparten un principio clave en física: la ruptura espontánea de simetría. Este fenómeno ocurre cuando la configuración de mínima energía de un sistema (también llamada «vacío», o estado fundamental) posee menos simetrías que la teoría completa. Los tres ejemplos siguientes ilustran la situación.

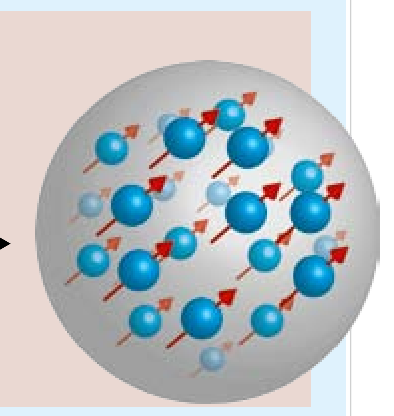
Ferroimanes

Un imán se halla compuesto por una gran cantidad de dipolos magnéticos microscópicos. La imantación (la emergencia de los polos norte y sur) aparece cuando dichos dipolos se alinean en una misma dirección.



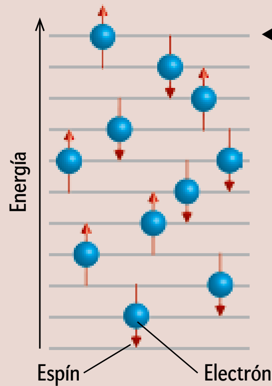
◀ Cuando la temperatura es elevada, la agitación térmica hace que los dipolos magnéticos se orienten en direcciones aleatorias e independientes entre sí. El sólido no presenta ninguna dirección privilegiada.

Cuando la muestra se enfría, el campo magnético de cada dipolo basta para orientar a sus vecinos en la misma dirección. El sólido se imanta y aparece un eje norte-sur, por lo que la simetría rotacional inicial se pierde. ▶



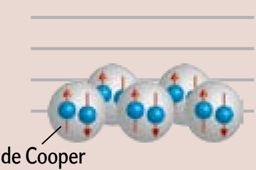
Superconductores

En un superconductor, los electrones pueden formar «pares de Cooper»: estados ligados de dos electrones con espín opuesto. Cada par de Cooper se comporta como un bosón, una clase de partículas que no obedecen el principio de exclusión de Pauli. Así, los pares de Cooper pueden «condensar» en un mismo estado de energía mínima. Cuando eso ocurre, el material se torna superconductor.



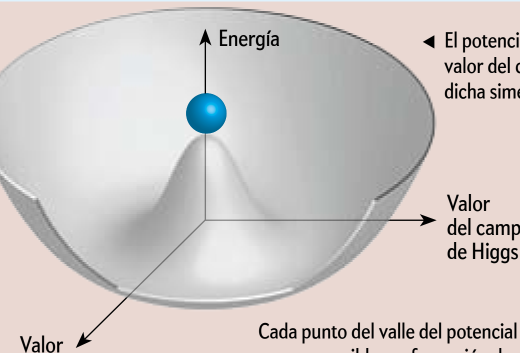
◀ A altas temperaturas, los electrones se propagan de manera independiente. Los electrones son fermiones, por lo que obedecen el principio de exclusión de Pauli. En consecuencia, en cada nivel energético solo puede haber, como máximo, dos electrones (con espín opuesto).

Por debajo de cierta temperatura crítica, los pares de Cooper se asientan en el estado de mínima energía. Dicha configuración rompe la invariancia gauge, una propiedad matemática fundamental de las ecuaciones del electromagnetismo. ▶



Modelo estándar

Hoy sabemos que el universo se encuentra impregnado por el campo de Higgs. En cada punto del espacio, dicho campo se halla sometido a un potencial como el que muestra la figura, también conocido como «potencial de sombrero mexicano». Matemáticamente, el campo de Higgs se comporta como una bola que rueda sobre dicha geometría.



◀ El potencial es simétrico. No obstante, el valor del campo de Higgs que hace que dicha simetría sea aparente es inestable.



Cada punto del valle del potencial corresponde a una posible configuración de mínima energía. Cuando el campo de Higgs «cae» a una de ellas, la simetría inicial deja de ser manifiesta. ▶

se encuentran alineados unos con otros, por lo que «seleccionan» una dirección en el espacio. Dicha dirección puede ser cualquiera (puesto que la teoría completa sí es simétrica), pero, una vez escogida, la simetría inicial bajo rotaciones desaparece.

La analogía «superconductora» del modelo de Nambu es ahora clara: la ruptura espontánea de la simetría quiral al escoger un vacío corresponde, en la teoría BCS, a la pérdida de invariancia gauge que tiene lugar cuando el superconductor se asienta en su estado fundamental. Por otra parte, el equivalente al bosón de espín 0 y sin masa que aparecía al romperse la simetría lo constituyen las excitaciones colectivas del superconductor que, antes de introducir la interacción coulombiana, carecían de una energía umbral de excitación.

Pronto se vio que los bosones sin masa del modelo de Nambu constituían una consecuencia genérica del mecanismo de ruptura espontánea de simetría. Este resultado, conocido como teorema de Goldstone, fue formulado en 1961 por Jeffrey Goldstone, de la Universidad de Cambridge, y demostrado para teorías de campos relativistas por él mismo en colaboración con Abdus Salam y Steven Weinberg, por entonces en el Colegio Imperial de Londres. Los correspondientes bosones sin masa reciben el nombre de bosones de Goldstone, o bosones de Nambu-Goldstone.

¿BOSONES SIN MASA?

La idea de que una simetría pudiera romperse espontáneamente fue muy bienvenida en física de partículas, ya que permitía aplicar las simetrías —una herramienta matemática muy poderosa— a la descripción de fenómenos en los que estas no se mostraban de manera explícita. Sin embargo, la aparición de bosones de Nambu-Goldstone resultaba mucho menos atractiva, ya que no había ningún indicio experimental de su existencia.

En 1954, Chen-Ning Yang y Robert Mills, del Laboratotio Nacional de Brookhaven, habían formulado una clase de teorías que generalizaban el electromagnetismo. Al igual que este, dichas teorías también resultaban invariantes frente a cierta clase de transformaciones gauge. En ellas, sin embargo, las interacciones quedaban mediadas por varios tipos de «fotones»; es decir, por varios bosones de espín 1 y sin masa (al contrario que el electromagnetismo, que solo describe un tipo de fotón).

Las teorías de Yang-Mills se convertirían con el tiempo en la piedra angular sobre la que se formularía el modelo estándar de la física de partículas. No obstante, una de sus primeras aplicaciones fue la construcción de modelos de la interacción nuclear fuerte, en los que la invariancia gauge se identificó con ciertas simetrías de la física nuclear, como el isospín. Esos modelos, que quedarían finalmente superados en la década de los setenta con la formulación de la cromodinámica cuántica, adolecían de un grave problema. Dado el corto alcance de la interacción fuerte, era de esperar que bosones mediadores de la interacción tuviesen masa. Sin embargo, la invariancia gauge de las teorías de Yang-Mills exigía que su masa fuese exactamente igual a cero.

En 1962, Julian Schwinger, uno de los padres de la electrodinámica cuántica, entró en el debate con un breve y críptico artículo en el que se preguntaba si la existencia de bosones mediadores sin masa era realmente ineludible en las teorías con invariancia gauge. Aunque su respuesta fue que podrían evitarse bajo ciertas condiciones, su trabajo no ofrecía ningún ejemplo concreto en que estas se cumplieran. En una segunda contribución, aplicó sus ideas a una versión simplificada de electrodinámica cuántica con una sola dimensión espacial. En ese caso particular, el físico demostró que el «fotón» sí podía adquirir masa sin comprometer la invariancia gauge.

A pesar de lo elusivo del resultado, el primer artículo de Schwinger ejerció una importante influencia intelectual sobre Anderson. Para él, el doble problema de la masa nula de los bosones de Nambu-Goldstone y el de los bosones sin masa de Yang-Mills guardaba claras reminiscencias con la teoría BCS. En esta, la inclusión de la interacción coulombiana hacía aparecer una energía mínima de excitación para los modos colectivos, lo cual resultaba análogo a una masa para los bosones de Nambu-Goldstone. Por otra parte, el apantallamiento de los campos magnéticos característico del efecto Meissner-Ochsenfeld podía interpretarse de manera natural como la existencia de una masa efectiva para el fotón.

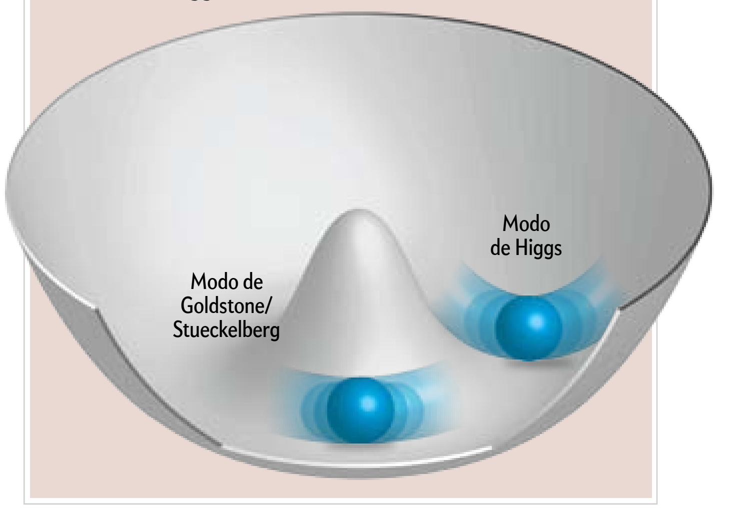
En 1963, Anderson dio a conocer sus ideas en un artículo hoy célebre. Su argumento se basaba en el hecho de que, si bien un bosón de espín 1 y sin masa —como el fotón— solo puede tener dos polarizaciones independientes, un bosón de espín 1 con masa presenta tres polarizaciones: las dos transversales (horizontal y vertical, por ejemplo) y una longitudinal. Anderson demostró que, en un superconductor, el modo colectivo que permitía restablecer la invariancia gauge se combinaba con las dos polarizaciones habituales del campo electromagnético, lo que

OSCILACIONES EN EL VACÍO

La vida en el valle de Higgs

La ruptura espontánea de simetría modifica la dinámica de un sistema físico. Una vez alcanzado el estado de mínima energía en un potencial de tipo sombrero mexicano, el campo considerado conserva dos grados de libertad. El primero, conocido como modo de Goldstone, o modo de Stueckelberg, corresponde a las oscilaciones a lo largo de la dirección plana del valle de potencial. Puede activarse («echarse a rodar») sin coste energético alguno, por lo que físicamente se encuentra asociado a una partícula sin masa. En el modelo estándar este modo no se observa como tal, sino que se combina con las partículas portadoras de la interacción débil.

En el caso de las oscilaciones radiales, la curvatura hace que sea necesaria una energía mínima para excitarlas. En términos físicos, tales oscilaciones se corresponden con un bosón masivo de espín 0. En el modelo estándar, este no es otro que el bosón de Higgs.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

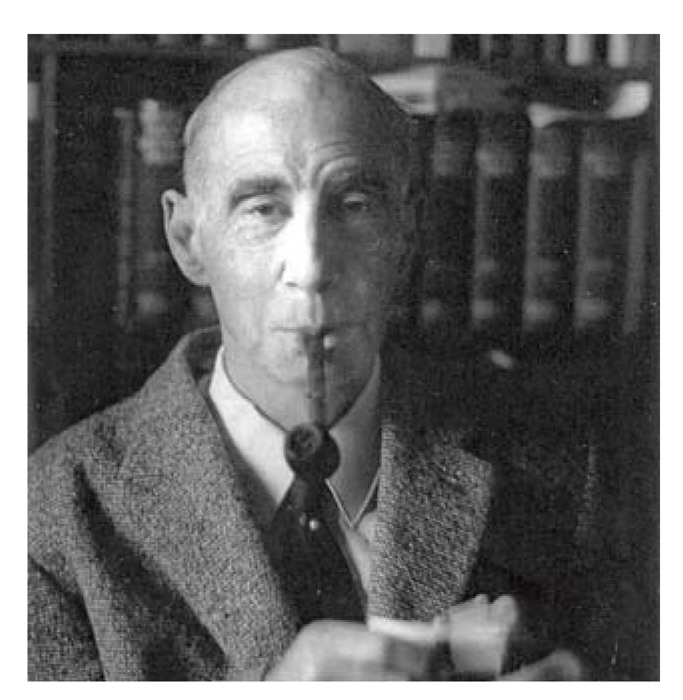
daba lugar a las tres polarizaciones características de un fotón con masa. Aunque el caso estudiado por Anderson no resultaba compatible con la teoría de la relatividad especial, el físico conjeturó la existencia de un mecanismo relativista aplicable en física de partículas. Lo expresó diciendo que el problema de los bosones sin masa de Nambu-Goldstone y el de los bosones sin masa de Yang-Mills podrían «cancelarse» mutuamente.

A pesar de todo, el mecanismo propuesto por Anderson no encandiló a los físicos de partículas. Aunque parecía proporcionar una manera elegante de evitar los bosones sin masa en materia condensada, su aplicación a las teorías de campos relativistas resultaba, cuando menos, dudosa. En particular, no quedaba claro cómo evitar las consecuencias generales del teorema de Goldstone, que en teorías relativistas había sido demostrado con un alto grado de rigor matemático.

LA LLEGADA DEL BOSÓN DE HIGGS

En un artículo publicado en marzo de 1964, Abraham Klein y Benjamin Lee, de la Universidad de Pensilvania, argumentaron que el teorema de Goldstone no podía aplicarse a las teorías no relativistas del tipo de las usadas por Anderson. Según los autores, ello abría la posibilidad de evitar los resultados del teorema también en el caso relativista. Pero dicha conclusión fue puesta en tela de juicio tres meses después por Walter Gilbert, físico de Harvard que estaba a punto de iniciar una exitosa carrera como bioquímico que en 1980 le llevaría a ganar el Nobel de química. Gilbert sostenía que las razones aducidas por Klein y Lee para invalidar el teorema de Goldstone no podían generalizarse a teorías relativistas y que, por tanto, los bosones sin masa de Nambu-Goldstone eran ineludibles en física de partículas.

Es en el contexto de esta controversia cuando aparecieron los trabajos independientes de Brout y Englert (el 26 de junio de 1964) y Higgs (el 15 de septiembre y el 19 de octubre). Sus artículos, hoy ya clásicos, zanjarían para siempre la cuestión de cómo «evadir» el teorema de Goldstone. La solución dada en ambos casos estaba formulada en términos del mismo modelo: un campo escalar (de espín 0) dotado de carga eléctrica que, en el vacío, adquiría un valor distinto de cero. Ello rompía espontáneamente la invariancia gauge y, como consecuencia, aparecía una versión relativista del mecanismo de Anderson: el bosón de Nambu-Goldstone resultante de la ruptura de la simetría gauge se mezclaba con las dos polarizaciones del fotón, lo que generaba las tres polarizaciones de un fotón con masa.



PIONERO DE LA TEORÍA DE CAMPOS: Aunque no tan conocido como otros de sus colegas, Ernst C. G. Stueckelberg fue uno de los físicos teóricos más brillantes del pasado siglo. Algunos de sus trabajos contribuyeron de manera decisiva a aclarar el significado físico de la invariancia gauge.

En su segundo trabajo, Higgs mostraba que, además de ese fotón masivo, el modelo contenía un bosón escalar con masa: el que hoy conocemos como bosón de Higgs. En términos físicos, este se correspondía con las oscilaciones espaciotemporales del campo escalar que rompía la invariancia gauge. Aunque dicha partícula no se mencionaba explícitamente en el artículo de Brout y Englert, sí se encontraba implícita en su análisis. En él, los investigadores consideraban asimismo el caso de interacciones de Yang-Mills con varios bosones mediadores.

El 16 de noviembre de ese año apareció el trabajo de Carl Hagen, Gerald Guralnik y Tom Kibble, del Colegio Imperial de Londres, en el que también discutían el modelo propuesto por Brout, Englert y Higgs. En 1967, Salam y Weinberg aplicaron dicho mecanismo al modelo de la interacción electrodébil propuesto en 1961 por Sheldon Glashow, por entonces en Caltech. El modelo de Glashow no era invariante gauge, ya que en él las partículas tenían asignada una masa explícita. Sin embargo, al incorporar el mecanismo de Higgs, Brout y Englert, el resultado era una teoría en la que, a bajas energías, la invariancia gauge quedaba espontáneamente rota por el valor que tomaba el campo de Higgs en el vacío. Como consecuencia, los bosones mediadores de la interacción débil (las partículas *W* y *Z*) adquirían masa y, al mismo tiempo, también lo hacían las partículas como los electrones. Así quedaría formulado lo que, una vez incorporada la cromodinámica cuántica, se convertiría en el modelo estándar de la física de partículas.

EL LEGADO DE STUECKELBERG

La razón última por la cual el mecanismo propuesto por Brout, Englert y Higgs evita los bosones sin masa predichos por el teorema de Goldstone se debe a que la invariancia gauge no es una simetría en el sentido en el que este término suele entenderse en física. Por regla general, cuando una simetría actúa sobre un estado físico, el resultado es otro estado físico o una superposición de ellos. Las transformaciones gauge, sin embargo, no cambian el estado físico sobre el que actúan, sino solamente la «etiqueta matemática» con la que lo caracterizamos. Es decir, se trata en realidad de una redundancia a la hora de describir los estados físicos de un sistema.

Dicha redundancia resulta sin embargo muy útil, ya que permite describir teorías como el electromagnetismo o la cromodinámica cuántica de forma local (sin acciones a distancia) e invariante relativista, dos propiedades clave en física de partículas. A pesar de ello, a efectos prácticos de cálculo a veces resulta necesario reducir o eliminar la redundancia gauge. Para ello debe determinarse una prescripción sobre cómo fijar las etiquetas matemáticas en cuestión. Al hacerlo, la teoría resultante pierde la invariancia gauge de la formulación original.

En el caso del mecanismo de Brout-Englert-Higgs, la teoría sigue manteniendo la invariancia gauge, si bien esta se encuentra espontáneamente rota en el vacío. Lo que ocurre es que existe una

AIP EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES

LA MASA EN EL MODELO ESTÁNDAR

Tres tipos de masa

Aunque el mecanismo de Brout-Englert-Higgs (BEH) constituye una piedra angular de la teoría de las interacciones electrodébiles, originalmente fue propuesto en el contexto de los primeros modelos de la interacción nuclear fuerte. Estos predecían la existencia de dos tipos de partículas sin masa que, sin embargo, no se observaban en los experimentos: los bosones de Goldstone (que aparecen en teorías con simetrías espontáneamente rotas) y los bosones sin masa mediadores de las interacciones (análogos al fotón).

El mecanismo de BEH, propuesto en 1964, explicó por qué esas partículas sin masa no se correspondían con los estados físicos de la teoría. Su aplicación al modelo electrodébil llegó tres años después, de la mano de Steven Weinberg y Abdus Salam. En su formulación definitiva, el modelo estándar explica la masa de las diferentes partículas por medio de tres procesos:

Absorción de bosones de Goldstone

En el caso de los bosones W^+, W^- y Z (los mediadores de la interacción débil), la generación de sus masas ocurre porque el bosón de Higgs posee «carga débil». Ello rompe espontáneamente la invariancia gauge de dicha interacción y, como consecuencia, surgen tres bosones de Goldstone (G). El mecanismo de BEH implica que estos no se observan como grados de libertad independientes, sino que se combinan con los bosones mediadores de la interacción débil, lo que les confiere sus respectivas masas.

Por otro lado, el hecho de que el bosón de Higgs no posea carga eléctrica implica que el fotón no adquiere masa.

Interacción con el bosón de Higgs

La masa de las partículas como los quarks y los electrones (e) se halla estrechamente ligada a su acoplamiento con el bosón de Higgs (h). La intensidad de dicha interacción resulta proporcional a la masa de cada partícula. Por ello, una manera muy eficiente de generar bosones de Higgs en colisionadores como el LHC es a través de la producción de quarks t y b. Al ser los más masivos, son también los que se acoplan con mayor intensidad al bosón de Higgs.

Interacciones fuertes

Aunque el mecanismo de BEH confiere masa a las partículas elementales por medio de los dos procesos anteriores, la mayor parte de la masa que existe en el universo no tiene este origen. En el caso del protón y el neutrón, los quarks (q) que los constituyen apenas dan cuenta del 1 por ciento de su masa total. El 99 por ciento restante procede de la energía de la interacción nuclear fuerte, mediada por los gluones (g), por lo que no guarda ninguna relación con la ruptura espontánea de la simetría electrodébil. Dado que la mayor parte de la masa del átomo se encuentra en el núcleo, podemos concluir que el mecanismo de BEH solo es responsable de una fracción mínima de la masa que observamos a nuestro alrededor.

manera de fijar la redundancia de la teoría completa en la que el bosón sin masa de Nambu-Goldstone desaparece. Simultáneamente, aparece la polarización longitudinal del bosón mediador de la interacción, lo que le confiere masa. En la terminología de Anderson, esta es la manera en que el problema de Yang-Mills y el de Nambu-Goldstone se cancelan uno a otro.

Con todo, la idea de que la polarización longitudinal de un campo gauge masivo podía transmutarse en un bosón de espín cero y sin masa llevaba ya más de dos decenios sobre la mesa. En 1938, el físico de la Universidad de Ginebra Ernst Stueckelberg se había percatado de que era posible recorrer el camino inverso a la fijación de gauge; es decir, que la invariancia gauge podía introducirse «a mano» en teorías que originalmente no la tenían. Stueckelberg estudió un modelo que describía un fotón con masa y que, como tal, no era invariante bajo las transformaciones gauge del electromagnetismo. Sin embargo, esta «deficiencia» podía resolverse añadiendo un nuevo campo escalar que también cambiase bajo una transformación gauge. Si sus variaciones se escogían de la manera adecuada, de modo que compensasen las del modelo de partida, el resultado era una teoría invariante gauge.

El proceso descrito corresponde a introducir deliberadamente —a través del nuevo campo de Stueckelberg— la redundancia característica de las teorías gauge. Del modelo con un fotón con masa y tres polarizaciones independientes, pasamos a una teoría invariante gauge que contiene un fotón sin masa (con dos polarizaciones) y un bosón de espín 0. Para recuperar la teoría original, basta con escoger la regla de fijación de gauge de tal modo que el campo de Stueckelberg se convierta en la polarización longitudinal del fotón masivo con el que habíamos comenzado. Desde este punto de vista, una teoría sin invariancia gauge siempre puede interpretarse como el resultado de fijar el gauge en una teoría que sí exhibe dicha invariancia.

¿Qué ocurre en el caso del modelo estándar? Como mencionábamos arriba, Salam y Weinberg aplicaron el mecanismo de Brout-Englert-Higgs al modelo electrodébil de Glashow, gracias a lo cual obtuvieron una teoría invariante gauge de las interacciones electrodébiles. Sin embargo, el mismo objetivo puede lograrse añadiendo al modelo de Glashow un campo de Stueckelberg. El resultado es una teoría que también es invariante gauge, la cual describe adecuadamente los procesos físicos que tienen lugar por debajo de cierta escala de energías. No obstante, al acercarnos a dicha escala comenzarán a aparecer problemas. Se trata de las mismas dificultades de las que adolecía el modelo de Glashow, lo cual no debería sorprendernos si recordamos que lo único que hemos hecho ha sido introducir artificialmente una

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

La ruptura espontánea de simetría había aparecido de forma tácita en algunos sistemas de materia condensada, como el modelo de Heisenberg de los ferroimanes

redundancia en el modelo original, el cual podemos recuperar sin más que imponer una fijación astuta de gauge.

Para resolver los problemas que aparecen al aplicar el truco de Stueckelberg, deberemos incorporar a la teoría nuevos grados de libertad que se exciten a la escala de energías a la cual esta comienza a fallar. Hay varias maneras de lograr este objetivo. Podría ocurrir que los bosones de Stueckelberg no fuesen elementales, sino que estuviesen compuestos de partículas de espín 1/2. Esta posibilidad se conoce como hipótesis de tecnicolor (un término ingenioso para referirse a los números cuánticos de dichas partículas, análogo al «color» de los quarks que componen los hadrones). A energías suficientemente altas, los bosones de Stueckelberg se «disolverían» en dichos fermiones, los cuales interaccionarían entre sí a través de un nuevo campo gauge.

Otra posibilidad reside en que el campo de Stueckelberg se corresponda con las configuraciones de mínima energía de un campo escalar elemental: uno caracterizado por un conjunto continuo de vacíos, en cada uno de los cuales la invariancia gauge se encuentre espontáneamente rota. A bajas energías, las únicas excitaciones posibles serían los bosones de Stueckelberg, los cuales pueden absorberse en las componentes longitudinales de los bosones mediadores. A energías elevadas, sin embargo, también debería ser posible excitar las fluctuaciones de dicho campo escalar elemental, las cuales quedarían descritas por un bosón masivo de espín 0 (*véase el recuadro* «La vida en el valle de Higgs»). Esta es la alternativa que corresponde al modelo de Brout, Englert y Higgs y la que, según los resultados del LHC, parece haber escogido la naturaleza.

EL UNIVERSO A CORTAS DISTANCIAS

El concepto de simetría cumple una función central en la física contemporánea, ya que se trata de uno de los instrumentos más potentes y efectivos de los que disponemos a la hora de formular teorías. El mundo que vemos a nuestro alrededor, sin embargo, no es particularmente simétrico. De ahí que la idea de la ruptura espontánea de simetría se haya convertido en uno de los elementos básicos en nuestra descripción del mundo físico.

Su primera aparición tuvo lugar de forma tácita en algunos sistemas de materia condensada, como el modelo de Heisenberg de los ferroimanes o en la teoría fenomenológica de la superconductividad de Ginzburg y Landáu. En física de partículas, la idea aparece en la teoría del campo unificado propuesta por Heisenberg en los años cincuenta del siglo xx. Aunque considerada un desarrollo marginal, se trata probablemente del primer ejemplo de una teoría de campos con múltiples vacíos de simetría reducida. De hecho, fue usada por Nambu para construir su modelo de ruptura espontánea de la simetría quiral.

El carácter universal del mecanismo de ruptura espontánea de simetría hace que algunos resultados, como el teorema de Goldstone, desempeñen una función clave más allá de la física de partículas. Así ocurre en materia condensada, donde incluso el bosón de Higgs, icono contemporáneo de la física de altas energías, tiene su contrapartida en el campo de la superconductividad. En 1981, Peter Littlewood y Chandra Varma, de los Laboratorios Bell, propusieron el análogo a una partícula de Higgs para explicar ciertos resultados experimentales de dispersión Raman en un superconductor de seleniuro de niobio. Este modo colectivo «de Higgs» tiene su origen en las inhomogeneidades espaciales de la energía umbral del superconductor, que oscilan y se propagan.

Pero, a pesar de dichas similitudes, existe una diferencia crucial entre el modo de Higgs de la superconductividad y el bosón de Higgs del modelo estándar. Mientras que el primero aparece como resultado de la interacción de los electrones en el material, el segundo se corresponde con las excitaciones de lo que parece ser un campo fundamental de la naturaleza. En materia condensada, el modo colectivo de Higgs se resuelve en sus constituyentes elementales al considerar distancias del orden de su tamaño cuántico característico, una situación que presenta ciertas reminiscencias con el escenario de tecnicolor.

La situación es muy diferente en el caso del bosón de Higgs. En la teoría electrodébil, la ruptura de la invariancia gauge no se debe al acoplamiento fuerte de otros grados de libertad, sino a la existencia de un nuevo bosón de espín 0, cuyo acoplamiento es débil y que no presenta estructura interna a las escalas de su tamaño cuántico. Su masa es además pequeña comparada con las escalas naturales del problema. Se trata, de hecho, de la primera vez que encontramos algo así en la naturaleza.

El descubrimiento anunciado en el CERN hace ahora dos años tiene por tanto un alcance mayor que la simple constatación experimental de un mecanismo universal de ruptura de simetría. Nos está diciendo que la estructura del universo a cortas distancias es radicalmente distinta de lo que habíamos visto hasta ahora en otros sistemas cuánticos.

PARA SABER MÁS

Los artículos originales de F. Englert y R. Brout; P. Higgs; y G. S. Guralnik, C. R. Hagen y T. W. Kibble fueron publicados en 1964 en *Physical Review Letters*. Hoy son de acceso libre y pueden consultarse en **prl.aps.org/50years/milestones#1964**

My life as a Boson. Conferencia de Peter Higgs en el Kings College de Londres, noviembre de 2010. Disponible en **www.ph.ed.ac.uk/higgs/life-boson**

Eyes on a prize particle. Luis Álvarez-Gaumé y John Ellis en *Nature Physics*, vol. 7, págs. 2-3, enero de 2011.

Life after 13/12/11. Conferencia de Nima Arkani-Hamed en la 29.ª Escuela de Invierno de Física Teórica de Jerusalén, diciembre de 2012. Disponible en **www.youtube.com/watch?v=QfSTvGMT41o**

An invitation to quantum field theory. Luis Álvarez-Gaumé y Miguel Á. Vázquez-Mozo. Springer, 2012.

The BEH mechanism, interactions with short range forces and scalar particles. Real Academia Sueca de las Ciencias, octubre de 2013. Disponible en **www.nobelprize.org/ nobel_prizes/physics/laureates/2013/ advanced-physicsprize2013.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

Teorías gauge de las fuerzas entre partículas elementales. Gerard 't Hooft en *IyC*, agosto de 1980.

Philip W. Anderson: El genio hosco de la física de la materia condensada. John Horgan en *IyC*, marzo de 1995.

Onnes y el descubrimiento de la superconductividad. Rudolf de Bruyn Ouboter en *IyC*, mayo de 1997.

Cuando se rompe la simetría: Higgs, supersimetría, dimensiones extra. Edward Witten en *IyC*, abril de 2005.

Un abanico de partículas. Jeremy Bernstein en *IyC*, septiembre de 2012.

por Roy H. Hamilton y Jihad Zreik



Roy H. Hamilton es docente en el Centro de Neurociencia Cognitiva de la Universidad de Pennsylvania.

Jihad Zreik es doctorando en el Colegio Universitario de Londres, donde realiza experimentación cognitiva en un laboratorio de estimulación cerebral.

Pensamientos electrificados

¿Deberíamos usar un dispositivo que nos tornara más inteligentes y aumentara nuestra capacidad de atención?

Resulta difícil imaginar a nadie, por brillante que sea, que no ansíe ser más inteligente todavía. Avances recientes en las neurociencias podrían hacer realidad tal deseo. Se están descubriendo formas para «subir de vueltas» el cerebro antes imposibles. Pero —y esta es la cuestión—, ¿deseamos de veras habitar en ese mundo?

Quizá sea demasiado tarde para plantearla. La sociedad moderna ha abrazado ya la idea de sintonizar finamente nuestros intelectos mediante procedimientos artificiales, idea que podríamos denominar «neurología cosmética». Los escolares toman Adderall, Concerta y otros medicamentos para fijar la atención. Padres y maestros recurren a antidepresivos y a fármacos contra la ansiedad. Y los libros de autoayuda ofrecen los últimos avances de las neurociencias para ayudarnos a pensar más clara y rápidamente.

Súmase a estos progresos otro método de refuerzo cognitivo: la estimulación transcraneana por corriente continua (ETcc, o tDCS, en siglas inglesas). Con esta técnica, se inyectan en el cerebro corrientes continuas de muy débil intensidad mediante electrodos sobre el cuero cabelludo. Estos hilillos de electricidad parecen provocar ajustes incrementales en los potenciales eléctricos de las neuronas más próximas a los electrodos, aumentando o atenuando su probabilidad de excitación. Ello, a su vez, induce modificaciones medibles en la memoria, el habla, el estado de ánimo, la función motora y otros dominios de la cognición.

Todavía se ignora si la ETcc puede provocar modificaciones neuronales a largo plazo. Aunque en la mayoría de los ensayos se aprecian solo efectos transitorios, existen indicios de que la repetición de aplicaciones podría tener efectos más persistentes. El procedimiento no ha sido aprobado por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense, y el consenso entre expertos es que solamente debe ser realizado bajo supervisión cualificada. Con todo, utilizado correctamente, es seguro, portátil, fácil de aplicar y económico.

La idea es tan sencilla que algunos «manitas» se han construido por sí mismos dispositivos para uso doméstico, desdeñando las advertencias disuasorias.



RYAN INZANA

Aunque no todo el mundo esté dispuesto a tales imprudencias, la estimulación cerebral electrónica tiene probabilidades de arraigar. En una encuesta reciente por Internet, el 87 por ciento de quienes respondieron manifestaron a los autores su disposición a ensayar la ETcc si eso pudiera mejorar su rendimiento escolar o laboral.

¿Deberemos bendecir esta oportunidad de volvernos más inteligentes, más rápidos, de contar con versiones más atentas de nosotros mismos? Aunque unos pocos neurocientíficos han respaldado sin reservas el uso generalizado de este birrete de aceleración del pensamiento, otros —entre quienes nos contamos— no lo vemos tan claro. En todo dispositivo biomédico la seguridad es fundamental. ¿Y qué decir de la justicia distributiva? ¿Y si los ricos llegaran a usar estos aparatos para potenciar su ya privilegiada situación?

Otras cuestiones resultan más desconcertantes. Es concebible que las técnicas de manipulación cerebral como la ETcc pudieran permitir a los usuarios reconfigurar la maquinaria nerviosa que subyace a facetas críticas de la experiencia cognitiva y a la noción de uno mismo. Al llevar este pensamiento a su conclusión lógica, se podría preguntar si los usuarios podrían, finalmente, hallar formas de transformarse a sí mismos. Y aún más allá, ¿sería aceptable imponer a otros tales cambios (estudiantes, trabajadores, soldados, etcétera) con el fin de reforzar ciertas destrezas? ¿Y qué decir de la sociedad misma? De ser cierto que los individuos desarrollan fibra moral al luchar contra sus propias limitaciones, ¿no se perdería algo fundamental si cada tarea cognitiva problemática o cada momento emotivamente difícil pudiera aliviarse con la pulsación de un botón?

Dudamos que se llegue a semejantes extremos. Sin embargo, vale la pena considerarlos al contemplar decisiones que pudieran tener consecuencias inesperadas. Toda posible técnica de ampliación cerebral tendrá que ser evaluada caso por caso, a la par que la sociedad vaya adquiriendo una comprensión más plena de las pérdidas y las ganancias. De alcanzar tales procedimientos una difusión amplia, recaería en los científicos y en los profesionales que los aplicasen la responsabilidad de enseñar al público a utilizar la técnica de forma segura y apropiada. Hasta entonces, lo único que cabe decir es que la ETcc y otros instrumentos similares suscitan gran interés... y no menos recelo.

por M. Demestre, R. Sáez y M. Masó

Basura en el lecho oceánico

Los plásticos que se acumulan en los fondos marinos amenazan el equilibrio de los ecosistemas bentónicos

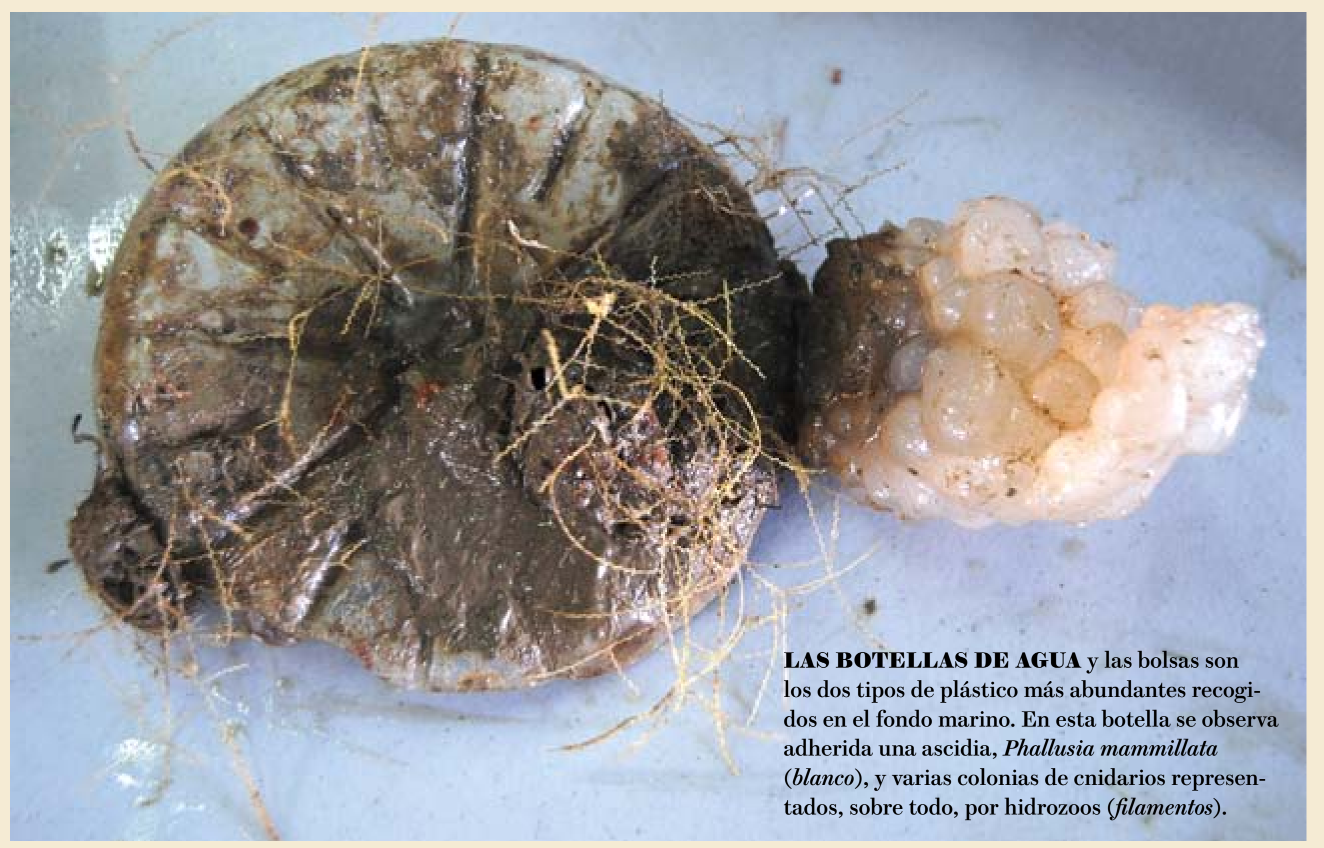
En los últimos cuarenta años, la producción de plásticos y su empleo diario se ha disparado. Más de un tercio de ellos son de un solo uso y se desechan en menos de un año. Una parte importante va a parar al mar, lo que supone una amenaza para sus ecosistemas.

Los plásticos flotantes transportados por las corrientes marinas y los vientos constituyen solo la cara más visible de la problemática, ya que muchos se hunden y se depositan en el fondo en zonas preferentes de acumulación. Como consecuencia, se originan formaciones de sustratos artificiales que son aprovechados por las comunidades bentónicas (las que habitan en el lecho marino), especialmente en las de fondos de fango o arena, donde escasean los sustratos que pueden ser colonizados con facilidad.

Los plásticos pueden servir como medio de asentamiento, protección y transporte, incluso como soporte para depositar los huevos. De este modo, se crean distintos microhábitats que van cambiando según se van adhiriendo nuevos organismos. La colonización de la basura se produce siguiendo una sucesión ecológica. Primero se asientan microorganismos, como bacterias y microalgas (diatomeas y dinoflagelados), que forman biopelículas sobre el sustrato artificial [*véase* «Plásticos colonizados», por J. M. Fortuño et al.; Investigación y Ciencia, abril de 2012]. Se crea así un hábitat apropiado en el que pueden instalarse algas multicelulares y diferentes invertebrados, entre ellos poliquetos, briozoos, cnidarios, bivalvos, ascidias, esponjas, cirrípedos y gasterópodos.

El hecho de que los plásticos aparezcan recubiertos de organismos podría hacer pensar que este material no resulta nocivo. Sin embargo, esta colonización artificial provoca una alteración en el equilibrio natural de las comunidades bentónicas. Se favorecen las especies oportunistas que pueden competir, desplazar e incluso depredar a las especies nativas de estos ecosistemas y reducir su biodiversidad. Además, una proliferación de organismos sobre plásticos en el fondo marino podría acarrear hipoxia o incluso anoxia en este medio, lo que interferiría en el funcionamiento y la estructura de sus comunidades.

—M. Demestre, R. Sáez y M. Masó
Departamento de recursos marinos renovables,
Instituto de Ciencias del Mar (CSIC)



LAS BOTELLAS DE AGUA y las bolsas son los dos tipos de plástico más abundantes recogidos en el fondo marino. En esta botella se observa adherida una ascidia, *Phallusia mammillata* (*blanco*), y varias colonias de cnidarios representados, sobre todo, por hidrozoos (*filamentos*).

R. SÁEZ, M. MASÓ Y S. DE JUAN (*fotografías*)



CIRRÍPEDOS DEL GÉNERO *LEPAS* adheridos por el pedúnculo al borde de un cubo de plástico recogido a 100 metros de profundidad.

ESPONJA que coloniza un arte de pesca, la línea de un palangre recogido a 50 metros de profundidad.

LOS GASTERÓPODOS necesitan algún tipo de sustrato para depositar su puesta. En este caso, han utilizado una bolsa de basura que se hallaba en el fondo marino.

por J. Francisco Álvarez



J. Francisco Álvarez es catedrático de lógica y filosofía de la ciencia en la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).

La irrupción de las masas y la sabiduría colectiva

Sugerencias de la filosofía para las ciencias sociales

Con excesiva frecuencia la filosofía se ha acercado a las ciencias sociales exhibiendo credenciales históricas para intentar disputarles el espacio de reflexión sobre la acción humana —espacio que en realidad comparten—, para recordarles la necesidad de una adecuada teoría de la acción social o bien para criticarles su supuesta falta de cientificidad. Así, la psicología, la sociología, la ciencia política, la antropología y la economía serían vistas simplemente como disciplinas intrusas en los asuntos específicamente humanos, cuyo estudio correspondería de manera prioritaria a la filosofía.

Sin embargo, es más apropiado plantearse la tarea filosófica como algo más modesto, aunque no menos importante y exigente: como una reflexión sobre las prácticas de la ciencia, sobre sus mecanismos explicativos y sobre las herramientas que utilizan para lograr conocimiento. En definitiva, la filosofía de las ciencias sociales intenta analizar de forma crítica y positiva lo que son realmente las ciencias sociales, en vez de estipular lo que deberían ser.

En mi opinión, el cambio más radical que se está produciendo actualmente en las ciencias sociales proviene de transformaciones muy profundas en su objeto de estudio y en las técnicas de investigación utilizadas. Siempre se ha discutido qué métodos fiables pudieran ser interesantes para el estudio de los grupos sociales y de los seres humanos en sociedad. Según John Stuart Mill, estos deberían inspirarse en las ciencias naturales. Como afirmó en su *Lógica de las ciencias morales* (1843), «el atraso de las ciencias morales solo se puede remediar aplicándoles los métodos de las ciencias físico-naturales, adecuadamente ampliados y generalizados». Hoy en día, me parece importante constatar que se están buscando mecanismos para extender los procedimientos de las ciencias naturales, de modo que nos permitan avanzar en los objetivos de las ciencias sociales.

El giro experimental que se está produciendo dibuja una nueva senda. Se están cosechando resultados muy importantes para comprender tanto la acción humana individual como las regularidades producidas por la interacción y los agrupamientos sociales. Así, la economía experimental se ha consolidado como un importante ámbito de estudio social en el último medio siglo. Obtuvo, como recuerda el filósofo de las ciencias sociales Francesco Guala, de la Universidad de Milán, un importante respaldo institucional con la concesión a Daniel Kahneman, de la Universidad de Princeton, y a Vernon Smith, de la Universidad Chapman, en el año 2002, del premio del Banco de Suecia en ciencias económicas en homenaje a Alfred Nobel. El comité Nobel dejaba claro que «un cuerpo creciente de investigación se dedica a modificar y contrastar los supuestos económicos básicos, la investigación en economía descansa de manera creciente en la obtención de datos en el laboratorio más que en el campo».

Otro movimiento similar ha sido la expansión de la economía del comportamiento, que está penetrando en el complejo mundo de la racionalidad humana y en los mecanismos de la interacción social. Es un intento de superar modelos del comportamiento humano demasiado simplistas, que estaban en la base de algunas de las teorizaciones previas de la economía y la política. Lo hace expandiendo sus prácticas experimentales desde los laboratorios hasta las situaciones más cercanas a la vida real. En buena medida, ello conecta con la propuesta que hizo Herbert Simon en 1960. El economista y politólogo estadounidense veía ya entonces la necesidad de revisar el modelo de ser humano situado en la base de las teorías económicas. Y hoy parece cada vez más claro que el comportamiento humano inteligente no siempre se caracteriza bien a través de una idea simple de racionalidad.

Al mismo tiempo, las ciencias sociales están incorporando los resultados de las neurociencias que, por doquier, penetran más y más en el conocimiento del fun-



CORTESÍA DEL AUTOR

cionamiento del cerebro y de las correspondientes capacidades cognitivas que tenemos como individuos.

Otro cambio crucial es el que se refiere a la relación entre el enfoque grupal y el individual. Estamos aprendiendo, incluso de manera práctica, que el agrupamiento de seres humanos puede producir resultados que no esperábamos y que, como producto de la interacción, la acción de los colectivos va más allá de las capacidades que tiene cada uno de sus miembros. Algo que ya había señalado Aristóteles en la *Política* (III, 10, 1282a15), cuando decía: «Aunque cada individuo sea peor juez que los expertos, la totalidad conjunta de todos aquellos será mejor juez o, por lo menos, no peor».

Reconocer y aprovechar el conocimiento que pueden generar las multitudes lleva a organizar nuevas formas de producción del conocimiento, que, en parte, están siendo abordadas por especialistas en teoría de la computación, psicólogos experimentales y economistas del comportamiento. Parece interesante avanzar sobre ello algunas consideraciones conceptuales típicamente filosóficas.

La revolución provocada por Internet, las redes sociales y los dispositivos móviles, que conforman lo que los sociólogos Lee Rainie, del Centro de Investigación Pew en Washington, y Barry Wellman, de la Universidad de Toronto, llaman el individualismo interconectado, crea nuevas condiciones para que los agrupamientos humanos puedan producir conocimiento de calidad, sin tener que aceptar inevitablemente como mejor la dirección tecnocrática de los expertos.

En ese marco aparece la aportación de economistas del comportamiento como Cass R. Sunstein, de la Universidad Harvard, y Richard Thaler, de la Universidad de Chicago, que muestran la importancia de tener en cuenta la arquitectura de la información. Quizá no sea tampoco el momento de analizar los elementos principales del enfoque del paternalismo libertario (que es como suelen caracterizar a la propuesta político-organizativa derivada de su enfoque), pero sí de decir que tiene interés ver la posible conexión de sus propuestas con lo que llamaré tercera etapa de estructuración sociotecnológica de las masas, la era de las multitudes en línea y a distancia.

En una sociedad que se articula en torno a la información y que considera a esta un recurso esencial para la vida de las personas, de las organizaciones y de las sociedades, resulta interesante poner en claro que se trata de información no neutral, que se puede estructurar desde cualquiera de los múltiples intereses en juego.

No es cuestión tanto de insistir en una teoría formal de la información, que expanda el modelo de Claude E. Shannon y Warren Weaver, ni de precisar aspectos técnicos del procesamiento de la información, sino de afrontar directamente la naturaleza de la información para los seres humanos. Hay que tratar de precisar un modelo humano más adecuado, que nos indique cómo compilamos y compartimos la información pertinente para nuestros objetivos y fines, para la resolución de los problemas que voluntariamente queremos afrontar o bien de aquellos que se nos planteen socialmente con independencia de nuestra voluntad.

La masa, en vez de aparecer como generadora de problemas, se presenta hoy como fuente de inteligencia colectiva

La conexión entre las personas ha sufrido en los últimos decenios transformaciones importantes provocadas por la generalización de las tecnologías de la información y la comunicación. Esas nuevas formas de interconexión provocan un cambio muy importante en las capacidades de las masas que, a diferencia de viejas conceptualizaciones arrogantes o peyorativas, se vienen ahora analizando como masas inteligentes (*smart mobs*, en la terminología del ensayista estadounidense Howard Rheingold), de las que parece emerger algo muy tangible y nada místico que podría caracterizarse como sabiduría colectiva.

Las cosas están cambiando en la práctica de nuestras sociedades, y a las ciencias sociales les corresponde analizar esa evolución. En el plano teórico ya se ha avanzado un poco y hay quienes hablan de una tercera etapa en la teorización sobre la masa y las multitudes. En la primera etapa se consideraba la masa como agente irracional y peligroso. Así pensaban Gabriel Tarde y Ortega y Gasset. En la segunda, la masa se toma como impulsora del cambio y abanderada de una protesta racional formulada por las élites, que se apoyan en la fuerza de la masa y no en la capacidad cognitiva de la multitud. Hasta llegar, en tercer lugar y en fechas más recientes, a considerar las masas como fuente de conocimiento y sabiduría. «Masa estructurada», «colaboración masiva», «innovación abierta» e «innovación de usuarios» —en palabras del profesor de innovación tecnológica del Instituto de Tecnología de Massachusetts Eric von Hippel— son ya términos comunes. La masa, en vez de aparecer como generadora de problemas, se presenta hoy como fuente de inteligencia colectiva. Se abre así la posibilidad de generar soluciones inesperadas, eficientes, poco costosas y originales a los problemas complejos.

Estos son asuntos que requieren nuevos marcos de reflexión, y la filosofía de las ciencias sociales haría bien en abordarlos con cierta premura. Esta tercera etapa de la presencia de las masas en una sociedad interconectada nos permite reformular la sabiduría de las multitudes en términos que siguen la estela aristotélica, como viene sugiriendo el economista Mark N. Wexler, de la canadiense Universidad Simon Freser.

Nos hallamos ante una posible gestión democrática de la complejidad, que comienza a llamarse gobierno abierto (*open government*) y que trata de aprovechar la posibilidad nueva de una expansiva democracia cognitiva. Esto es parte de lo que puede sugerir una reflexión filosófica que trata de observar y analizar lo que hacen hoy los científicos sociales. A la postre, aunque la filosofía de las ciencias sociales deba renunciar a sus aspiraciones normativas, tiene por delante una tarea importante y exigente.

PARA SABER MÁS

Nudge: Improving decisions about health, wealth, and happiness. Cass R. Sunstein y Richard Thaler. Yale University Press, 2008.

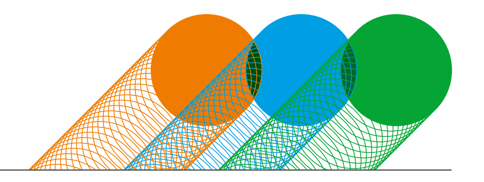
The social epistemology of experimental economics. Ana Cordeiro dos Santos. Routledge, 2010.

Reconfiguring the sociology of the crowd: Exploring crowdsourcing. Mark N. Wexler en *International Journal of Sociology and Social Policy*, vol. 31, n.º 1/2, págs. 6-20, 2011.

Collective wisdom: Principles and mechanisms. Hélène Landemore y Jon Elster. Cambridge University Press, 2012.

Primeros pasos hacia una filosofía de la ciencia en una sociedad digital. J. Francisco Álvarez en *Cuadernos Hispanoamericanos*, vol. 757, págs. 7-20, 2013.





BIOLOGÍA

LOS NÓBEL Y LA FÁBRICA DEL CUERPO

Investigación y Ciencia ha divulgado numerosos artículos de ganadores del premio Nobel (*Scientific American* más de 245 desde 1845). Presentamos aquí extractos de relatos conservados en nuestro archivo que en su día ofrecieron una visión novedosa del funcionamiento del cuerpo. Esta selección pretende ser un tributo a los científicos que a comienzos de este mes se darán cita en Alemania con ocasión de la 64.ª Reunión de Premios Nóbel en Lindau, en la que cerca de 600 jóvenes investigadores destacados intercambiarán ideas y descubrimientos con 38 nóbeles de fisiología o medicina.

Recopilación de Ferris Jabr — Ilustraciones de Sam Falconer

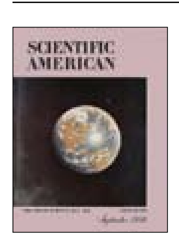
EN SÍNTESIS

Este mes se reúnen en la isla de Lindau, Alemania, premios nóbel de medicina y fisiología con cientos de jóvenes científicos destacados.

Para celebrar el encuentro, presentamos una selección de extractos de artículos de biología de los archivos de *Investigación y Ciencia* y *Scientific American*, cuyos autores han recibido el premio Nobel.

Los pasajes revisitan varias partes del cuerpo, como los músculos, el cerebro y el sistema inmunitario.

BIOQUÍMICA

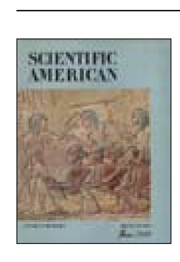


Fisiología

Por Edgar Douglas Adrian
Publicado en septiembre de 1950
Premio Nobel en 1932

La fisiología aspira a describir los fenómenos que ocurren en el cuerpo y ayudar con ello a la labor del médico. ¿Pero qué fenómenos debe explicar y en qué términos? Sobre esta cuestión se ha producido un cambio de perspectiva en el último medio siglo. Hoy suele admitirse que, a pesar de que la fisiología concierne a los procesos de la vida, en definitiva debe formular sus descripciones en el marco de la física y de la química.

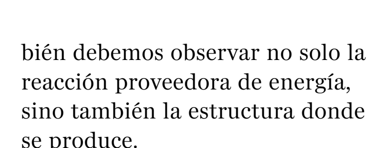
La fisiología decimonónica pudo no ser tan ambiciosa. Había mucho por descubrir acerca de la estructura y las actividades a gran escala de los diversos órganos y no se intentaba ahondar en los cambios físicos y químicos que ocurrían en su seno, para lo cual no existían suficientes métodos de medición precisos. Esa primera fase ha concluido. Los problemas más obvios de la organización general del cuerpo han sido resueltos. Los fisiólogos han tomado prestadas numerosas técnicas novedosas de las ciencias exactas y su interés se está orientando hacia la biofísica y la bioquímica.



Investigación muscular

Por Albert Szent-Györgyi
Publicado en junio de 1949
Premio Nobel en 1937

El músculo es una máquina y, como tal, hemos de considerar dos elementos. Uno es la reacción que proporciona la energía, como la expansión del vapor en la máquina de vapor, la ignición del combustible en el motor de combustión interna o el flujo de corriente en el motor eléctrico. Estas reacciones elementales solo pueden generar trabajo útil si tienen lugar en una estructura específica, ya sea un cilindro y un pistón o una bobina y un rotor. Así, pues, en el músculo también debemos observar no solo la reacción proveedora de energía, sino también la estructura donde se produce.

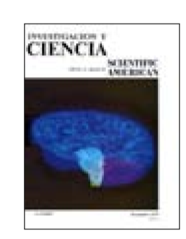


La reacción energética es un cambio químico que tiene lugar entre moléculas, por lo que su estudio compete a la bioquímica. La estructura concierne al anatomista, que opera con el bisturí y el microscopio óptico o electrónico. Ambas vías de investigación resultan apasionantes. Parece razonable suponer que la reacción energética sea idéntica, al menos en esencia, en todos los seres vivos. El estudio del músculo nos conduce, por tanto, al principio mismo de la vida. Su estructura, aunque especializada,



puede desvelar de igual forma los principios fundamentales de la arquitectura biomolecular. En este sentido, el músculo deja de ser un problema especial. El estudio de su función confluye con el de la vida en el sentido más amplio; el músculo demuestra ser un material maravilloso y único para el estudio de la vida.

NEUROCIENCIA



Mecanismos cerebrales de la visión

Por Davis H. Hubel y Torsten N. Wiesel
Publicado en noviembre de 1979
Premio Nobel en 1981

El córtex cerebral, una placa muy replegada de tejido neural de unos dos milímetros de espesor, es una corteza externa que recubre (y en cierta medida se repliega debajo de) los hemisferios cerebrales. En este artículo pretendemos esbozar el actual estado del conocimiento de una subdivisión del córtex: el córtex visual primario, la más fundamental de las regiones corticales empeñadas en la visión.

Empezaremos trazando la ruta visual en un primate, desde la retina al córtex. La salida de cada ojo llega al cerebro a través de cerca de un millón de fibras nerviosas empaquetadas entre sí en el nervio óptico. Estas fibras son los axones de las células ganglionares de la retina. Una proporción grande de las fibras del nervio óptico pasan sin interrupción a dos grupos de células profundamente situadas en el cerebro, los llamados núcleos geniculados laterales, donde forman sinapsis. Las células geniculadas laterales envían, a su vez, sus axones directamente al córtex visual primario.

Para examinar el funcionamiento de esta ruta visual, nuestra estrategia desde finales de la década de los cincuenta ha sido (en principio) simple. Empezando, por ejemplo, con las fibras del nervio óptico, registramos mediante microelectrodos a partir de una única fibra nerviosa, y tratamos de descubrir de qué manera podíamos influir más efectivamente en la descarga de la misma, estimulando la retina con luz. Para ello pueden utilizarse pautas luminosas de cualquier tamaño, forma y color imaginables, brillantes sobre un fondo oscuro o al revés, e inmóviles o en movimiento. Al trabajar así, observamos que tanto una célula ganglionar retiniana como una célula geniculada responden mejor a una mancha de luz aproximadamente circular de un tamaño determinado en una parte dada del campo visual.

La primera de las dos principales transformaciones que realiza el córtex visual es la redistribución de la información aferente, de manera que la mayoría de sus células respondan no a puntos de luz sino a segmentos lineales específicamente orientados. En el córtex existe una gran variedad de tipos celulares, algunos más simples y otros más complejos en sus propiedades de respuesta, y pronto se tiene la impresión de que existe una especie de jerarquía, en la que las células más simples envían información a las más complejas. Una célula típica responde solo cuando la luz cae sobre una determinada zona del mundo visual. La mejor respuesta se obtiene cuando se hace destellar en la región una línea que tenga la inclinación adecuada, o, en algunas células, cuando esta línea se hace pasar sobre la región. La orientación más efectiva varía de una célula a otra; por lo general, se halla definida de manera suficientemente precisa para que un cambio de 10 o 20 grados en el sentido de las agujas del reloj o en sentido antihorario reduzca mucho la respuesta o la anule. (Es difícil darse cuenta de la precisión de esta discriminación. Si de 10 a 20 grados parece un margen amplio, debe recordarse que el ángulo entre las doce en punto y la una en punto es de 30 grados.)

Hubo un tiempo, no muy lejano, en que uno miraba los millones de neuronas de las distintas capas del córtex y pensaba si alguien llegaría a tener jamás alguna idea acerca de su misión. Para el córtex visual, hoy parece conocerse la respuesta a grandes rasgos: determinados estímulos excitan o inhiben las neuronas; grupos de neuronas realizan, efectivamente, transformaciones particulares. Parece razonable pensar que si los secretos de unas cuantas regiones como esta pueden llegar a descubrirse, otras regiones desvelarán los suyos a su debido tiempo.



Biología molecular de la olfacción

Por Richard Axel
Publicado en diciembre de 1995
Premio Nobel en 2004

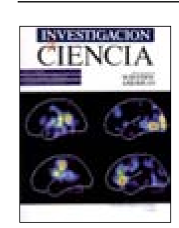
La anatomía básica de la nariz y del sistema del olfato se conoce desde hace algún tiempo. En los mamíferos, la detección de los olores ocurre en el epitelio olfatorio, una región de la zona posterior de la nariz. El análisis mediante microscopía electrónica de barrido revela dos tipos interesantes de células. En esta región, millones de neuronas, las células transductoras de señales de los sistemas sensoriales, proporcionan una conexión física directa entre el mundo exterior y el cerebro. Desde un extremo de cada neurona, los sensores piliformes llamados cilios se proyectan hacia el exterior y se hallan en contacto directo con el aire. En el otro extremo de la célula, una fibra denominada axón se dirige hacia el cerebro. Además, el epitelio olfatorio contiene células generadoras de neuronas olfatorias, que mantienen esa actividad a lo largo de toda la vida. A diferencia de la mayoría de las neuronas, que mueren y no se reemplazan, las neuronas sensoriales olfatorias se regeneran sin cesar.

Cuando un animal inhala moléculas olorosas, estas se unen a las proteínas receptoras, polipéptidos especializados y asociados a los cilios. La unión de los olores a estos receptores emite una señal eléctrica que se propaga, a través de los axones, hasta el bulbo olfatorio, situado en la parte frontal del cerebro, detrás mismo de la nariz. El bulbo olfatorio es la primera estación transmisora de señales en su camino al cerebro, donde ha de elaborarse, o procesarse, la información olfatoria; el bulbo pone en conexión la mucosa nasal con la corteza olfatoria, que entonces se proyecta hacia los centros sensoriales superiores de la corteza cerebral, área esta del cerebro que controla el pensamiento y la conducta. Bajo tal organización subyace una lógica compleja de la que el cerebro hace uso para identificar el olor percibido en la mucosa nasal, distinguirlo de otros e instar una respuesta emotiva o conductual.

Para analizar la organización del cerebro, mi grupo comenzó por el lugar donde el olor se percibe como algo físico: en las proteínas receptoras de los olores. Con Linda Buck opté por dejar de lado el examen directo de los receptores olfatorios para abordar los genes codificadores de dichas proteínas. Los genes proporcionan el molde de las proteínas, las moléculas que desempeñan las funciones de las células.

Recurrimos a la técnica de clonaje para aislar los genes que determinan los receptores olfatorios. La familia de genes de receptores en cuestión presentaban varias propiedades que los convertían en idóneos para las funciones de reconocimiento de olores. En primer lugar, los genes cifraban proteínas que encajan dentro de un grupo conocido de receptores cuyas moléculas atraviesan la membrana de la neurona siete veces; estos receptores activan proteínas G, polipéptidos de señalización. En las primeras investigaciones realizadas en este campo por Doron Lancet y Randall R. Reed, de la facultad de medicina Johns Hopkins, ya quedó claro que los receptores olfatorios también utilizan proteínas G para iniciar la cascada de fenómenos que dan como resultado la transmisión de un impulso eléctrico a lo largo del axón olfatorio. En segundo lugar, los genes que cifraban las proteínas del receptor de olores se mostraban activos solo en las neuronas olfatorias. Aunque casi todas las células del organismo llevan una copia de cada gen, muchos genes se expresan exclusivamente en células especializadas.

Por último, la existencia de una amplia gama de genes de receptores de olores parecía reflejar la gama, no menos sorprendente, de olores detectables. Al examinar ADN de distintos mamíferos, hombre incluido, determinamos que alrededor de 1000 genes cifraban 1000 receptores olfatorios diferentes. (Cada tipo de receptor se expresa en millares de neuronas.) Dado que el ADN de los mamíferos contiene probablemente alrededor de 100.000 genes, el hallazgo indica que el 1 por ciento de todos nuestros genes está dedicado a la detección de olores, siendo por tanto la familia de tales genes la mayor de todas las identificadas hasta la fecha en los mamíferos. La cantidad enorme de información genética dedicada al olor tal vez refleje la importancia de este sistema sensorial para la supervivencia y reproducción de los mamíferos.



Bases biológicas del aprendizaje y de la individualidad

Por Eric R. Kandel y Robert D. Hawkins
Publicado en noviembre de 1992
Premio Nobel en 2000 (Kandel)

Aspectos elementales de los mecanismos neuronales que intervienen en varios tipos de aprendizaje se pueden abordar hoy en su nivel celular e incluso molecular. [Se está de acuerdo en que] las formas del aprendizaje y de la memoria requieren un registro consciente. A estos tipos de aprendizaje se les llama declarativos o explícitos. Las formas de aprendizaje en que no interviene la consciencia permanecen sorprendentemente intactas en pacientes con lesiones lóbulo-temporales; se las califica de no declarativas o de implícitas.

El aprendizaje explícito es rápido y puede ocurrir tras el primer esfuerzo. Implica a menudo la asociación de estímulos simultáneos y permite almacenar información acerca de un suceso que se da en un tiempo y lugar determinados; de ahí que proporcione una sensación de familiaridad con sucesos previos. Por contra, el aprendizaje implícito, lento, acumula destreza a través de reiterados ensayos. Suele requerir la asociación de estímulos secuenciales y almacena información concerniente a las relaciones predictivas entre sucesos. El aprendizaje implícito se manifiesta principalmente por la mejora en el desempeño de ciertas tareas, sin que el sujeto sea capaz de describir con exactitud qué es lo que ha aprendido, y pone en juego sistemas mnémicos que no influyen en los contenidos del conocimiento general del individuo.

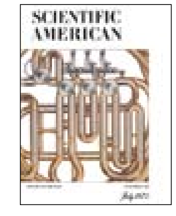
La existencia de dos formas distintas de aprendizaje ha obligado a los neurólogos reduccionistas a preguntarse si cada tipo poseerá representación celular. Donald O. Hebb, profesor de Milner, sugirió audazmente que el aprendizaje asociativo podría ser producido por un mecanismo celular sencillo. Propuso que las asociaciones podrían formarse por una actividad neural coincidente: «Cuando un axón de la célula A... excita la célula B y repetida o persistentemente participa en su activación, se produce algún proceso de desarrollo o cambio metabólico en una o en ambas células, de suerte que la eficacia de A, en cuanto célula excitadora de B, se intensifica». Según la regla hebbiana del aprendizaje, el que coincida la actividad de las neuronas presinápticas con la de las postsinápticas reviste importancia decisiva para el refuerzo de la conexión entre ellas (el así llamado mecanismo pre-postasociativo).

Ladislav Tauc y uno de los autores (Kandel) avanzamos una segunda regla del aprendizaje asociativo, en 1963, cuando trabajábamos en el Instituto Marey de París estudiando el sistema nervioso del caracol marino *Aplysia*. Resultó que la conexión sináptica entre dos neuronas podía reforzarse sin actividad de la célula postsináptica al intervenir una tercera neurona sobre la célula presináptica. La neurona moduladora, la tercera neurona en cuestión, provoca que de los terminales de la neurona presináptica se libere mayor cantidad de transmisores. Sugerimos entonces que este mecanismo podría adquirir propiedades asociativas si los impulsos eléctricos, los potenciales de acción, de la célula presináptica coin-

cidiesen con los potenciales de acción de la neurona moduladora (un mecanismo asociativo premodulador).

Posteriormente hallamos la confirmación experimental. Observamos el mecanismo asociativo premodular en *Aplysia*, donde contribuye al condicionamiento clásico, una forma implícita de aprendizaje. En 1986, Holger J. A. Wigstrom y Bengt E. W. Gustafsson, de la Universidad de Goteborg, averiguaron que el mecanismo pre-postasociativo se encuentra en el hipocampo, donde se utiliza en tipos de cambio sináptico que son importantes para el aprendizaje espacial, una forma explícita de aprendizaje.

INMUNOLOGÍA



El sistema inmunitario

Por Niels Kaj Jerne
Publicado en julio de 1973
Premio Nobel en 1984

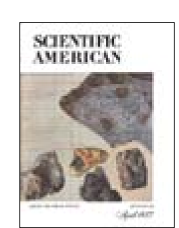
El sistema inmunitario y el sistema nervioso resultan equiparables en la complejidad de sus funciones. Ambos son órganos difusos, dispersos por la mayoría de los tejidos corporales. El primero pesa poco menos de un kilogramo en los humanos, pero está formado por cerca de un billón de células, los linfocitos, y unos 100 trillones de anticuerpos, moléculas sintetizadas y segregadas por los linfocitos. La habilidad especial del sistema inmunitario radica en el reconocimiento de patrones y su misión consiste en patrullar el cuerpo y proteger su identidad.

Las células y las moléculas inmunitarias se desplazan a los tejidos casi siempre a través de la sangre y penetran en su interior traspasando las paredes de los capilares. Después de viajar por el tejido emprenden el camino de retorno a través de un sistema vascular propio, el sistema linfático. La red de vasos recoge los linfocitos y los anticuerpos, además de otras células y moléculas, y el líquido intersticial que baña los tejidos corporales, y vierte su contenido en la sangre por la vena subclavia, situada detrás de la clavícula.

Los linfocitos abundan en los ganglios linfáticos, estaciones de tránsito distribuidas a lo largo de los vasos linfáticos, así como en los lugares donde nacen y maduran: la médula ósea, el timo y el bazo. El sistema inmunitario envejece y se renueva continuamente. Durante los minutos que el lector habrá dedicado a leer estas líneas, su cuerpo habrá producido 10 millones de linfocitos y 1000 billones de anticuerpos nuevos. Ello no resultaría tan sorprendente si todos esos anticuerpos fueran idénticos. Pero no lo son. Para afrontar la tarea de identificar patrones se debe contar con millones de moléculas distintas, de igual modo que se necesitan millones de llaves que encajen en millones de cerraduras diferentes. Los patrones específicos que los anticuerpos reconocen son los epítopos, que corresponden a fragmentos en la superficie de moléculas grandes, entre ellas proteínas, polisacáridos y ácidos nucleicos. Las moléculas portadoras de epítopos se denominan antígenos. Y resulta casi imposible hallar una molécula de gran tamaño que no lo sea.

Los sistemas inmunitario y nervioso destacan entre los órganos del cuerpo por su capacidad para responder a una amplísima gama de señales. Ambos presentan dicotomías: las células que los componen pueden captar y transmitir señales excitadoras e inhibidoras.

Las células nerviosas, o neuronas, ocupan un lugar fijo en el encéfalo, la médula espinal y los ganglios, y sus largas ramificaciones, los axones, las enlazan en red. La capacidad del axón para establecer sinapsis con el grupo correcto de neuronas exige por fuerza un mecanismo similar al reconocimiento de los epítopos. Los linfocitos son cien veces más numerosos que las neuronas y, a diferencia de ellas, se mueven con libertad. Sin embargo, también interaccionan entre sí, ya sea por contacto directo o por medio de los anticuerpos que segregan. Estos elementos reconocen y son reconocidos, y al hacerlo también tejen una red. Como sucede con el sistema nervioso, la modulación de la red por efecto de señales externas constituye su adaptación al mundo exterior. Los dos sistemas aprenden de la experiencia y construyen una memoria que perdura a base de refuerzo, pero que no es posible transmitir a la descendencia. Las sorprendentes analogías en la expresión de ambos órganos podrían tener su origen en las semejanzas de los grupos de genes que codifican la estructura y controlan su desarrollo y función.



Trasplantes cutáneos

Por Peter B. Medawar
Publicado en abril de 1957
Premio Nobel en 1960

Resulta evidente que la reacción contra un injerto es de naturaleza inmunitaria; esto es, una reacción del mismo tipo que desencadena el cuerpo contra las proteínas y los hematíes extraños y contra las bacterias. Ello se demuestra fácilmente mediante experimentos. Una vez que un ratón ha recibido y rechazado el trasplante de otro ratón, destruirá un segundo injerto del mismo donante con una rapidez más de dos veces mayor, y de un modo tal que no deja dudas sobre el funcionamiento de su sistema inmunitario. El animal también manifiesta esa sensibilidad exacerbada cuando solo recibe una inyección de células de los ganglios linfáticos extraídas de otro ratón que ha rechazado un injerto.

En la mayoría de las reacciones inmunitarias el organismo despliega anticuerpos como agente destructor que hará frente a proteínas extrañas, gérmenes, etcétera. La generación de anticuerpos forma parte de la respuesta contra un aloinjerto (trasplante entre animales de la misma especie), pero hay dudas de que estas moléculas sean el instrumento habitual de la reacción contra tal tipo de injertos. Paradójicamente, la concentración elevada de anticuerpos circulantes parece, en todo caso, debilitar la reacción, lo que prolonga un poco más la vida del injerto.

Los verdaderos responsables del ataque contra el injerto no parecen ser los anticuerpos, sino células producidas por las glándulas linfáticas. Ciertos experimentos ingeniosos de G. H. Algire apuntan sin duda en esa dirección.

En uno de tales experimentos se introdujo un aloinjerto en una cápsula porosa antes de proceder a su implantación en un ratón que había sido sensibilizado antes con otro aloinjerto del mismo donante. Cuando los poros de la cápsula resultaban lo bastante grandes para ser atravesados por células, el múrido destruía el injerto. Pero cuando los experimentadores utilizaban membranas con poros tan diminutos que permitían el paso de líquido pero no de células, el injerto sobrevivía.

La hipótesis de que el rechazo del trasplante depende de la acción de células explicaría por qué los injertos de córnea escapan indemnes. Esta parte del ojo carece de vasos sanguíneos, por lo que las células inmunitarias no pueden acceder al tejido nuevo.

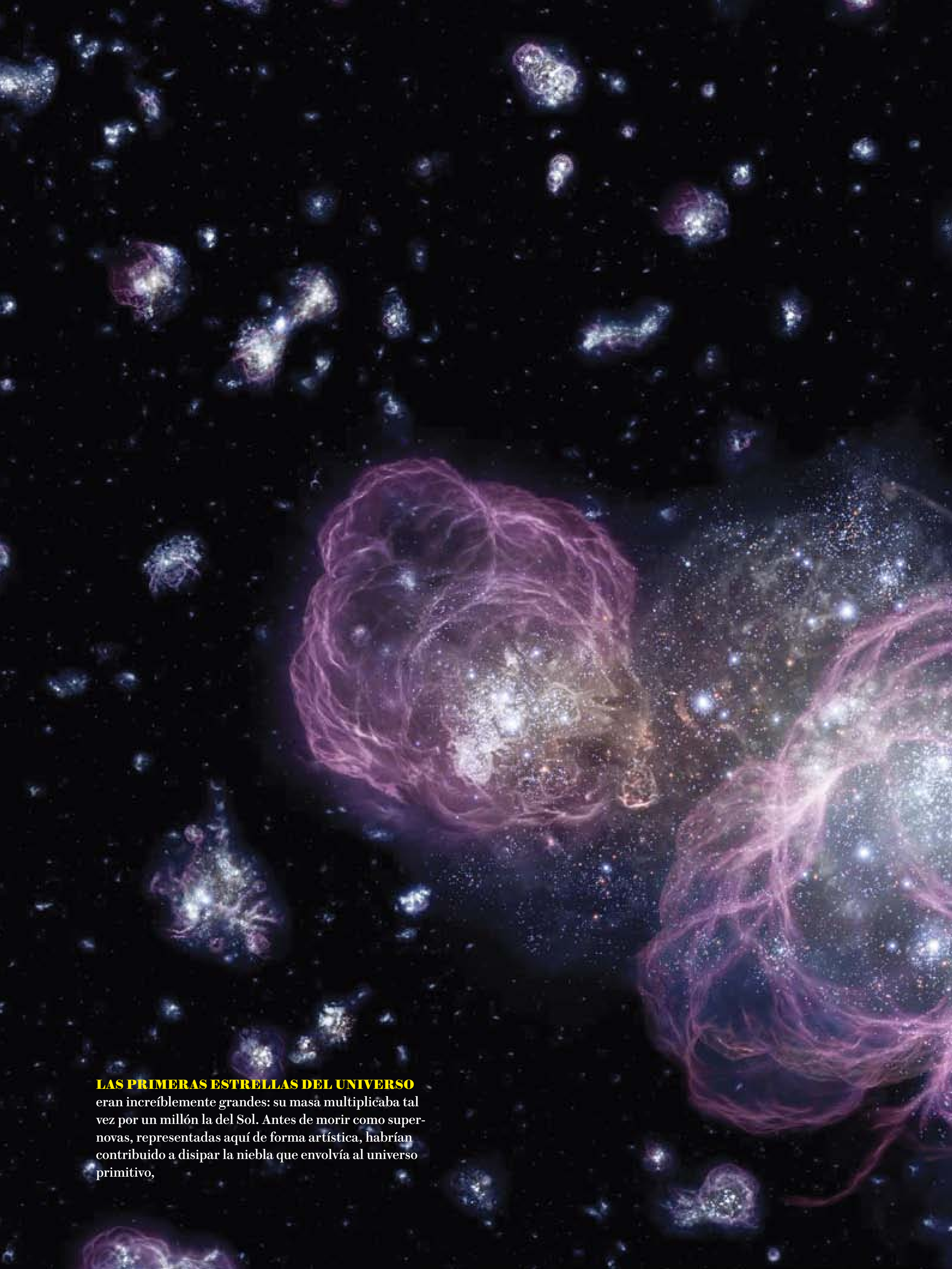
En el cerebro, en cambio, ocurre la situación inversa: el cerebro no presenta drenaje linfático, de modo que los antígenos liberados por el injerto no pueden viajar hasta los centros donde desatarían una respuesta inmunitaria. Ello tal vez explica el alto porcentaje de éxito de los trasplantes de aloinjertos en el cerebro.

PARA SABER MÁS

Reuniones de premios nóbel en Lindau: **www.lindau-nobel.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

Conmemoración de los Nobel. Ferris Jabr en *IyC*, junio de 2011.
Nóbeles y noveles. John Matson y Ferris Jabr en *IyC*, julio de 2012.
Una reunión de premios nóbel. Ferris Jabr en *IyC*, julio de 2013.



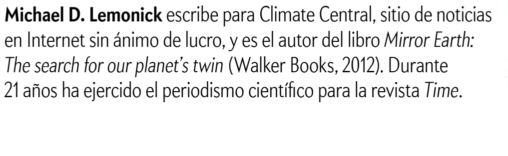
LAS PRIMERAS ESTRELLAS DEL UNIVERSO eran increíblemente grandes: su masa multiplicaba tal vez por un millón la del Sol. Antes de morir como supernovas, representadas aquí de forma artística, habrían contribuido a disipar la niebla que envolvía al universo primitivo,



El primer resplandor de las estrellas

Poco tiempo después del fogonazo de la gran explosión, el universo se quedó a oscuras. Los astrónomos están desvelando el misterio de su vuelta a la luz

Michael D. Lemonick


Michael D. Lemonick escribe para Climate Central, sitio de noticias en Internet sin ánimo de lucro, y es el autor del libro *Mirror Earth: The search for our planet's twin* (Walker Books, 2012). Durante 21 años ha ejercido el periodismo científico para la revista *Time*.



HACE POCO MENOS de trece mil ochocientos millones de años, apenas unos cuatrocientos mil después de la gran explosión, el universo se volvió repentinamente oscuro. Hasta aquel momento, la totalidad del universo visible era un caliente y agitado plasma, una densa nube de protones, neutrones y electrones. Si alguien hubiera estado allí para verlo, el universo le habría parecido una neblina, espesa, pero de brillo deslumbrante.

A los cuatrocientos mil años, sin embargo, el universo en expansión se había enfriado lo suficiente para que se formasen los primeros átomos de hidrógeno, fenómeno que recibe el nombre de recombinación. En ese momento la neblina se disipa, el universo sigue enfriándose y se produce un rápido fundido en negro: tras el inimaginable fulgor de la gran explosión y sus secuelas más inmediatas, el cosmos entra en lo que los astrónomos denominan la «era oscura del universo».

Y sí que era oscura. Incluso cuando las primeras estrellas fueron encendiéndose. En la parte ultravioleta del espectro era donde más brillaba su luz, precisamente la parte que el hidrógeno, recién formado por entonces, tiende a absorber. El universo cambió su niebla primordial, caliente y brillante, por otra, oscura y fría.

Esta segunda niebla se levantaría más adelante, pero cómo ocurrió se les viene escapando a los científicos desde hace mucho. Tal vez la despejaron las primeras estrellas, cuya intensa luz iría rompiendo, de forma gradual pero inexorable, los átomos de hidrógeno, en un proceso llamado reionización. O tal vez la energía necesaria para la reionización no provino de las estrellas, sino de la radiación emitida por el gas caliente que se precipitaba hacia los agujeros negros gigantes.

La clave para averiguar cuándo y cómo tuvo lugar la reionización está, no puede sorprender, en descubrir los objetos más viejos del universo e intentar desentrañar su naturaleza y origen. ¿Cuándo se encendieron las primeras estrellas y cómo eran? ¿De qué manera se agruparon las estrellas individuales para formar las galaxias, y cómo estas galaxias engendraron los agujeros negros supermasivos que casi todas albergan en el núcleo? ¿En qué punto de esta progresión, de las estrellas a las galaxias y de las galaxias a los agujeros negros, tuvo lugar la reionización? ¿Fue un proceso abrupto o gradual?

Se viene formulando estas preguntas desde los años sesenta del siglo pasado, pero solo en fecha reciente han alcanzado los grandes telescopios y modelos computacionales el nivel de detalle suficiente para proporcionar las primeras respuestas: los mo-

EN SÍNTESIS

Las primeras estrellas y galaxias del universo no eran iguales a las de hoy en día. Los astrónomos se remontan en el tiempo para investigar cómo se formaron los primeros objetos del universo.

En particular, les interesa averiguar qué causó la llamada reionización del universo, en la que la luz rompió los átomos de hidrógeno neutro que llenaban el cosmos.

Las observaciones y las simulaciones por ordenador apuntan a que los objetos responsables de la reionización pudieron ser estrellas de un millón de masas solares o los chorros gaseosos generados por agujeros negros gigantes.



Los primeros mil millones de años

Nada más que trescientos ochenta mil años después de la gran explosión —un abrir y cerrar de ojos a escala cósmica—, el universo se enfrió hasta el punto de que pudieran formarse átomos de hidrógeno, y todo se volvió oscuridad. Unos mil millones de años más tarde, el universo se hallaba completamente «reionizado»: la radiación había destruido los átomos, despejando así el camino para que la luz volviera a brillar. Pero ¿qué objetos desencadenaron la reionización? ¿Fueron estrellas, galaxias o los agujeros negros del centro de los cuásares?

Gran explosión

Inflación

Formación de partículas

Edad oscura

Primeras estrellas (alrededor de 100 millones de años)

Primeras galaxias (alrededor de 500 millones de años)

Cuásares (alrededor de 700 millones de años)

«Burbujas» de gas reionizado (*azul*)

Recombinación (380.000 años después de la gran explosión)

Era de la reionización

Las primeras estrellas del universo eran más luminosas en la parte ultravioleta del espectro. Pero el gas de hidrógeno neutro que impregnaba el cosmos absorbe la luz ultravioleta. Al final, la luz acabaría por romper los átomos de hidrógeno. Cuándo tuvo lugar este proceso, cuánto duró y qué lo causó han sido preguntas sin respuesta durante muchos años.

MOONRUNNER DESIGN

delos, mediante la simulación del nacimiento y evolución de las primeras estrellas del universo; y los telescopios, al recoger el tenue brillo de la luz procedente de los quinientos millones de años que siguieron a la gran explosión, cuando las primeras galaxias se hallaban en su infancia.

SUPERESTRELLAS

Hasta hace unos diez años se creía saber bastante bien cómo aparecieron las primeras estrellas. Justo después de la recombinación, los átomos de hidrógeno que llenaban el cosmos estaban distribuidos de manera prácticamente uniforme por el espacio. Por el contrario, la materia oscura, compuesta por unas partículas invisibles, todavía no identificadas, habría empezado ya a agruparse en unas nubes llamadas halos, con un promedio de alrededor de entre cien mil y un millón de masas solares. La gravedad de estos halos atraía el hidrógeno, que a medida que se iba concentrando y calentando se encendía: era la creación de las primeras estrellas.

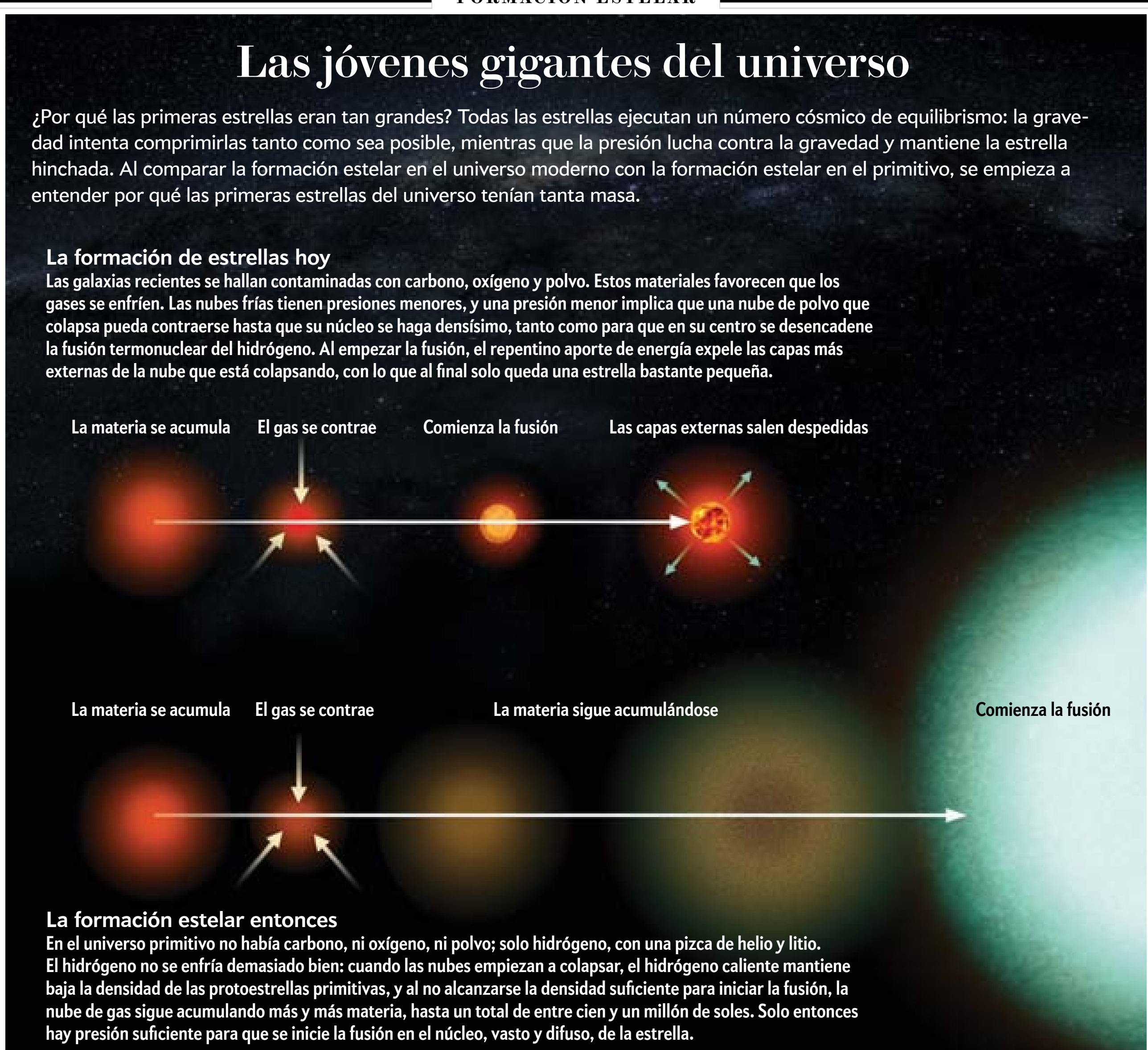
Esta primera generación de estrellas gigantes, conocidas bajo el nombre de Población III, podría haber roto el velo de gas de hidrógeno y reionizar el universo. Pero que de verdad sucediera así depende en gran medida de las características exactas de aquellas estrellas. Si no fueron suficientemente brillantes o no duraron bastante tiempo, no pudieron rematar la faena.

Qué características fueron esas depende mucho del tamaño que tuviesen las primeras estrellas. Hace una década se creía que debieron de ser gigantes por igual, con una masa más o menos cien veces la del Sol. La razón es que cualquier gas se calienta a medida que colapsa —es decir, a medida que cae sobre sí mismo por acción de la gravedad—, y el calor da lugar a la llamada presión de radiación, que se opone a la gravedad. A no ser que la estrella pueda deshacerse de parte de este calor, el colapso se detendrá.

Las primeras estrellas estaban compuestas casi exclusivamente por hidrógeno, que no es muy bueno en perder calor (las estrellas como el Sol contienen trazas de otros elementos, como el oxígeno y el carbono, que, pese a su escasez, resultan vitales para el enfriamiento). En consecuencia, las protoestrellas del universo primitivo seguirían acumulando hidrógeno, pero las altas presiones les impedirían formar un núcleo denso donde se desencadenase la reacción de fusión, que lanzaría una buena parte del gas circundante de vuelta al espacio. La estrella se

Las jóvenes gigantes del universo

¿Por qué las primeras estrellas eran tan grandes? Todas las estrellas ejecutan un número cósmico de equilibrismo: la gravedad intenta comprimirlas tanto como sea posible, mientras que la presión lucha contra la gravedad y mantiene la estrella hinchada. Al comparar la formación estelar en el universo moderno con la formación estelar en el primitivo, se empieza a entender por qué las primeras estrellas del universo tenían tanta masa.



limitaría a atiborrarse de gas hasta formar un núcleo difuso de masa muy grande.

Ahora, en cambio, dice Thomas Greif, investigador posdoctoral de la Universidad Harvard que efectúa algunas de las simulaciones más elaboradas de la formación de las primeras estrellas, «las cosas parecen un poco más complicadas». Las simulaciones más recientes no solo incluyen la gravedad, sino también las ecuaciones que describen los efectos de retroalimentación ligados a que el colapso vaya aumentando la presión del hidrógeno. Se obtiene entonces que el colapso de una nube de hidrógeno puede acabar de muchas maneras. En algunos casos, las primeras estrellas llegarían a una masa de hasta un millón de veces la del Sol. En otros, la nube se fragmentaría y nacerían varias estrellas de tan solo unas pocas decenas de masas solares.

Semejantes diferencias de tamaño suponen enormes variaciones en los tiempos de vida posibles de las primeras estrellas, y por lo tanto en cuándo podría haber tenido lugar la reionización. Las estrellas gigantes, de cien masas solares o más, son las roqueras de la astronomía: viven rápido y mueren jóvenes. Estrellas más pequeñas irían procesando lentamente su combustible nuclear, de modo que, si fueron las responsables de la reionización, el proceso se habría dilatado durante muchos cientos de millones de años.

LUCES NEGRAS

Independientemente de cuán grandes fuesen, todas estas estrellas acabaron su existencia como ardientes supernovas antes de que al derrumbarse sobre sí mismas se convirtiesen en agujeros negros. Y estos agujeros negros podrían —quizá más que las estrellas de las que provenían— haber alimentado el motor de la reionización.

Los agujeros negros engullen con voracidad el gas cercano; este se comprime y calienta hasta temperaturas de millones de grados mientras cae. Está tan caliente que, aunque la mayor parte acabe por desaparecer en el agujero negro, una fracción es catapultada hacia el espacio en forma de chorros, tan brillantes que su luz puede divisarse medio cosmos más allá. A estas balizas se las llama cuásares.

MOONRUNNER DESIGN

Desde los años sesenta hasta los noventa del siglo pasado, los cuásares fueron el único medio de explorar el universo primitivo. Al principio, no se tenía la más remota idea de qué eran. Se parecían a las estrellas cercanas, solo que presentaban enormes desplazamientos al rojo, el enrojecimiento de la luz debido a la expansión del universo. Los impresionantes corrimientos al rojo indicaban que estaban muchísimo más lejos que cualquier estrella observable individualmente, y que por tanto eran muchísimo más luminosos. El primero que se descubrió, 3C 273, presentaba un corrimiento al rojo de 0,16, lo que implica que su luz ha estado viajando durante unos dos mil millones de años.

«Entonces, muy rápidamente —explica el astrofísico de la Universidad de Princeton Michael A. Strauss—, empezaron a descubrirse cuásares con un corrimiento al rojo hasta de 2»; significaba que estábamos remontando más de diez mil millones de años hacia el pasado. En 1991, Maarten Schmidt, James E. Gunn y Donald P. Schneider, que trabajaban juntos en el Observatorio de Arizona, encontraron un cuásar con un desplazamiento al rojo de 4,9: correspondía a doce mil quinientos millones de años antes del presente, es decir, mil y pico millones de años después de la gran explosión.

Pero los análisis de este cuásar con un corrimiento al rojo de 4,9 no mostraron signos de que su luz hubiera sido absorbida por hidrógeno neutro. Parecía que el universo ya se había reionizado en la época en que la luz de este cuásar inició su viaje hacia la Tierra.

Durante la mayor parte de los años noventa no se encontró ningún cuásar más lejano que este. No por falta de instrumentación —al entrar en funcionamiento a principios de la década tanto el telescopio espacial Hubble como los telescopios Keck del monte Mauna Kea, en Hawái, se incrementó mucho la capacidad de realizar observaciones profundas del universo—. El problema estribaba en que los cuásares son escasos. Solo los generan los agujeros negros de mayor masa entre los supermasivos, y no los observamos desde nuestra perspectiva a no ser que el chorro de gas se dirija justo en nuestra dirección.

Además, esos chorros solo se crean cuando un agujero negro está absorbiendo gas de forma activa. En la mayor parte de los agujeros negros, esta clase de actividad tuvo su apogeo para valores del corrimiento al rojo entre dos y tres, cuando las galaxias eran, en promedio, mucho más ricas en gas que hoy. Si se observa más allá de ese momento oportuno de la historia cósmica, el número de cuásares desciende bruscamente.

Hasta el año 2000, cuando el Sondeo Digital del Cielo Sloan (SDSS, por sus siglas en inglés) comenzó a rastrear metódicamente una gigantesca franja del cielo con los detectores digitales más grandes construidos hasta la fecha, no se pulverizó el récord (los detectores habían sido diseñados por el propio Gunn, por entonces en Princeton). «El éxito del Sloan fue increíble en lo que se refiere al descubrimiento de cuásares lejanos —explica el astrónomo Richard Ellis, del Instituto de Tecnología de California—. Se encontraron del orden de cuarenta o cincuenta más allá de un corrimiento al rojo de 5,5.»

Pero el muestreo no pudo llegar mucho más allá, solo hasta un puñado de cuásares con valores del desplazamiento al rojo entre 6 y 6,4, e incluso a semejante distancia no había muestras de hidrógeno neutro. Solo con el hallazgo de un cuásar a un desplazamiento hacia el rojo de 7,085, por parte del Muestreo Profundo del Cielo Infrarrojo, realizado con el telescopio UKIRT (UKIDSS, por sus siglas en inglés), en Mauna Kea, se observaron pequeñas, pero significativas, cantidades de hidrógeno absorbente de la luz ultravioleta que oscurecían la luz del objeto. Con este cuásar, llamado ULAS J1120+0641, cuyo brillo nos llegaba desde alrededor de 770 millones de años tras la gran explosión, se rozaba por fin la era de la reionización cósmica, pero solo se la rozaba, porque incluso tan cerca de la gran explosión la mayor parte del hidrógeno neutro ya se había destruido.

O tal vez no. Este cuásar podría haber estado en una región del universo con los restos de hidrógeno neutro más dispersos de lo que era corriente; la mayoría de los cuásares a esa distancia quizás estuviesen más velados. De igual modo, es posible que la región de ULAS J1120+0641 fuera especialmente densa; tal vez la reionización ya estuviese casi concluida en casi cualquier otro sitio. Sin más ejemplos, no se puede estar seguro, y la probabilidad de encontrar un número de cuásares a esa distancia tan alto como para llevar a cabo un estudio estadísticamente fiable son muy bajas.

En cualquier caso, ULAS 1120+0641 tiene muchas cosas que decir a los astrónomos. Una de ellas, explica Ellis, es que el número de cuásares decae tan rápidamente con la distancia que resulta inconcebible que los agujeros negros masivos constituyan una fuente de radiación importante para la reionización del universo. Otra, que el agujero negro que alimenta este cuásar en particular tuvo que acumular mil millones de masas solares para producir la energía que lo hace visible desde tan lejos. Es casi imposible entender cómo pudo formarse en un tiempo tan breve como la edad del universo por aquel entonces.

Pero lo hizo. Abraham Loeb, director del departamento de astronomía de la Universidad Harvard, señala que si una estrella de primera generación, de cien masas solares, colapsó y se convirtió en un agujero negro unos cientos de millones de años tras la gran explosión, es concebible que creciera en el tiempo disponible hasta alcanzar las proporciones de un cuásar. Habría, eso sí, que alimentar constantemente al agujero negro, y es difícil imaginar que eso ocurriera, porque brillan con tal intensidad y producen tanta energía que expulsan el gas que los rodea. Sin un suministro de gas en las inmediaciones, el cuásar se apagaría temporalmente; el gas volvería a acumularse entonces, volvería a encenderse y la fuente de combustible sería barrida una vez más. «De modo que siempre se acaba en que existen ciclos de actividad —según Loeb—. El agujero negro solo puede crecer durante una fracción del tiempo.»

Sin embargo, dice, los agujeros negros también pueden crecer fusionándose entre ellos, lo que aceleraría su crecimiento. Además, los estudios recientes sobre el tamaño de las primeras estrellas indican que los agujeros negros primitivos quizá no se formasen a partir de estrellas de cien masas solares, sino de un millón, hipótesis propuesta en un artículo de 2003 que Loeb firmaba como coautor. «La idea se ha hecho popular», comenta, y simulaciones como las de Greif la avalan. «Y dado que estas estrellas son tan luminosas como la Vía Láctea entera, se podría, en principio, detectarlas con el telescopio espacial James Webb», el gigantesco sucesor del Hubble cuyo lanzamiento está programado actualmente para el año 2018.

EN BUSCA DE GALAXIAS

La caza de cuásares lejanos está en buena medida agotada, pero ahora se procede con intensidad a la búsqueda de galaxias más y más cercanas a la gran explosión. Despegó seguramente gracias a una imagen llamada Campo Profundo del Hubble. Fue obtenida en 1995, cuando Robert Williams, entonces director del Instituto Científico del Telescopio Espacial, utilizó una prebenda del oficio conocida como «tiempo discrecional del director» para apuntar

el Hubble a una región del cielo que parecía vacía y dejar el obturador abierto durante un total acumulado de unas treinta horas. Quería captar cualquier objeto débil que hubiese allí. «Algunos astrónomos muy serios le dijeron que era una pérdida de tiempo —recuerda el actual director, Matt Mountain—, que no iba a ver nada de nada.»

El telescopio detectó varios miles de galaxias pequeñas y débiles, muchas de las cuales resultaron ser de las más lejanas descubiertas hasta la fecha. Imágenes de Campo Profundo subsiguientes (realizadas con la nueva Cámara de Campo Ancho 3, instalada en el Hubble durante la misión de mantenimiento del año 2009, sensible al infrarrojo y unas 35 veces más eficiente que su predecesora) han encontrado más aún. «Hemos pasado de cuatro o cinco galaxias con desplazamientos al rojo por encima de 7 —explica el astrónomo observacional Daniel Stark, de la Universidad de Arizona y colaborador de Ellis desde largo tiempo atrás— a más de cien.» Una de ellas, descrita por Ellis, Stark y varios coautores en un artículo del año 2012, parece tener un desplazamiento al rojo no inferior a 11,9, menos de cuatrocientos millones de años después de la gran explosión.

Al igual que el cuásar más lejano, estas jóvenes galaxias pueden decirnos mucho sobre la distribución del hidrógeno intergaláctico en aquella época. Cuando se observa su producción de luz ultravioleta, una fracción significativa de la que cabría esperar no se detecta, absorbida por el hidrógeno neutro del entorno. Esa fracción disminuye lentamente a medida que se observan galaxias más alejadas de la gran explosión, y así hasta que, alrededor de los mil millones de años de vida del universo, el cosmos se vuelve transparente del todo.

Resulta casi imposible comprender cómo los agujeros negros pudieron crecer tanto en el corto espacio de tiempo que llevaba existiendo el universo por entonces. Pero el caso es que lo hicieron

En resumen, no solo existían galaxias que proporcionaban una fuente de radiación ionizante, sino que además esas mismas galaxias nos enseñan cómo fue pasando el universo de totalmente neutro a totalmente ionizado. Los detectives astronómicos ya tienen el arma del crimen y la víctima. Solo hay un problema. Si consideramos las ciento y pico galaxias que se conocen con desplazamientos al rojo superiores a 7 y extrapolamos a todo el cielo, no se obtiene suficiente radiación ultravioleta para ionizar todo el hidrógeno neutro. El arma no parece lo bastante potente para perpetrar el crimen que se le imputa. La energía necesaria tampoco puede provenir de los agujeros negros, dado lo difícil que es formar agujeros negros supermasivos en número suficiente con la rapidez necesaria.

Aun así, la respuesta podría ser bastante sencilla. Por muy débiles que nos parezcan, las galaxias que podemos detectar apurando hasta el extremo la visión del Hubble debían de ser las más brillantes de su época. Tiene que haber a esa distancia muchas más, demasiado tenues para verlas con los telescopios actuales. Si se hace esa suposición razonable, asegura Ellis, «creo que habrá pocos que no estén de acuerdo en que a las galaxias les tocó la mayor parte del trabajo de reionizar el universo».

LA BAZA DE EINSTEIN

En cuanto al aspecto de las galaxias auténticamente recién nacidas y a cuándo se encendieron por primera vez, todavía nos falta mucho camino por recorrer, admite Stark. Las galaxias que vemos son bastante pequeñas, y parecen mucho más jóvenes que las que se han estudiado en detalle de uno o dos mil millones de años más tarde, pero ya tienen nada menos que cien millones de estrellas, y la proporción de sus colores (una vez corregido el corrimiento al rojo) indica que son más rojas en promedio de lo que cabría esperar en una galaxia muy joven. Parece que estos objetos llevaban formando estrellas por lo menos cien millones de años. El Hubble nos ha llevado cerca del precipicio, adonde podremos ver la primera generación de estrellas, pero hará falta el telescopio espacial James Webb para llegar hasta allá.

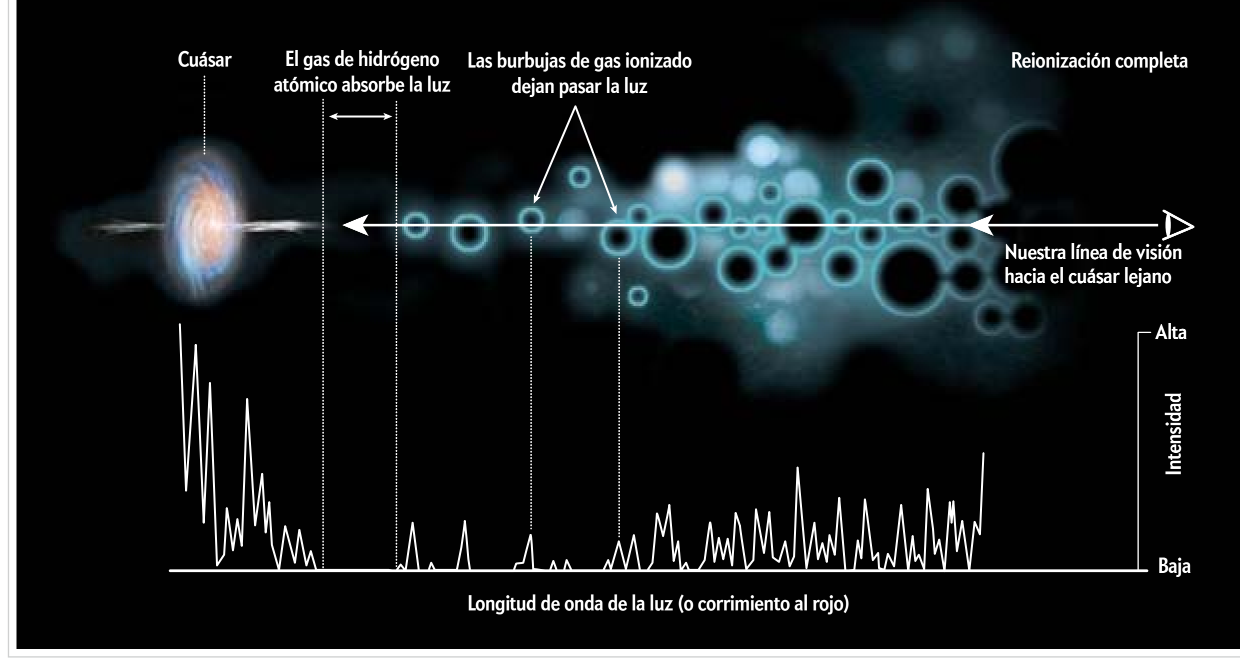
Sin embargo, el Hubble aún no ha agotado todas sus opciones. El telescopio propiamente dicho solo puede ver hasta cierto límite de luminosidad sin recurrir a exposiciones de una duración disparatada, pero el universo proporciona sus propias lentes naturales, que aumentan la capacidad magnificadora del Hubble. Las lentes gravitatorias se basan en que los objetos de masa muy grande (en este caso, los cúmulos de galaxias) curvan el espacio a su alrededor en grado suficiente para distorsionar, y en ocasiones magnificar, otros objetos situados mucho más allá.

En concreto, señala el astrónomo observacional Marc Postman, del Instituto Científico del Telescopio Espacial, se tiene una gran ampliación de cualquier galaxia muy distante que se encuentre situada detrás de los cúmulos. Pueden ser hasta diez o veinte veces más brillantes que galaxias similares que no sufren el efecto a una lente gravitatoria. Postman es el investigador principal del Muestreo de Supernovas y Lentes de Cúmulo del Hubble (CLASH, por sus siglas en inglés), programa de investigación que ha utilizado esta técnica para dar con alrededor de doscientas cincuenta galaxias más con desplazamientos al rojo entre 6 y 8, así como unas cuantas que podrían llegar hasta un valor de 11. Según lo que han descubierto hasta ahora, los resultados concuerdan con los aportados por los diferentes muestreos de Campo Profundo.

Ahora el Hubble va a observar a una profundidad aún mayor: Mountain ha dedicado parte de su tiempo discrecional de director a un nuevo proyecto, denominado Campos de Frontera, en el que se buscan imágenes ampliadas de galaxias distantes muy débiles situadas detrás de seis cúmulos especialmente masivos y magnificadores. A lo largo de los próximos tres años, sostiene Jennifer Lotz, la observadora principal del proyecto, «vamos a dedicar a cada uno de estos objetos del

En busca de cuásares

Los cuásares, potentes balizas que aún pueden vislumbrarse tras más de diez mil millones de años luz de viaje de su luz, se encuentran entre los objetos más brillantes del universo primitivo. A medida que la luz del cuásar avanza por el universo hacia nuestros telescopios, le ocurren dos cosas: en primer lugar, la expansión del universo la va estirando por el camino; por otro lado, cualquier nube de hidrógeno atómico que atraviese la absorberá en parte. Por lo tanto, cabe representar la absorción de luz en función de la longitud de onda para averiguar cómo ha ido cambiando la abundancia de hidrógeno con el tiempo. Los resultados indican la presencia de burbujas aisladas de gas ionizado cuya frecuencia y tamaño fueron aumentando a medida que evolucionaba el universo.



FUENTE: GEORGE DJORGOVSKI, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA; ABRAHAM LOEB, UNIVERSIDAD HARVARD

orden de ciento cuarenta órbitas del Hubble [cada órbita lleva asociados unos 45 minutos útiles de observación], lo que nos permitirá explorar el universo más allá de lo que se ha podido hasta ahora».

BUSCA DE ESTALLIDOS

Al mismo tiempo, otro tipo de baliza cósmica podría llegar a ser una manera aún mejor de investigar el universo primitivo. Cuando se los descubrió en los años sesenta del siglo pasado, los estallidos de rayos gamma (erupciones cortas de radiación de muy alta frecuencia que surgen en direcciones aleatorias) constituían un misterio indescifrable. Hoy en día, se cree que muchos de ellos se originan durante la muerte de estrellas de masa muy grande: cuando colapsan y crean agujeros negros, arrojan chorros de rayos gamma al espacio que, al dar contra las nubes de gas circundantes, encienden un resplandor secundario, un brillante rescoldo de luz visible e infrarroja observable por los telescopios tradicionales.

Así es como proceden las observaciones: cuando el observatorio orbital Misión de Estallidos de Rayos Gamma Swift detecta un fogonazo de radiación gamma, bascula para apuntar la instrumentación de a bordo hacia el punto de origen, y al mismo tiempo transmite sus coordenadas a los observatorios terrestres. Si sus telescopios llegan al punto antes de que se apague el destello, se podrá medir el corrimiento al rojo del resplandor secundario y, de este modo, la distancia —y la edad— de la galaxia donde tuvo lugar la erupción.

Lo que hace tan valiosa a esta técnica es que los estallidos de rayos gamma hacen palidecer a cualquier otro objeto del cosmos. Durante las primeras horas, explica Edo Berger, astrofísico de la Universidad Harvard especializado en estos estallidos, probablemente brillan un millón de veces más que las galaxias y son de diez a cien veces más luminosos que los cuásares. No hace falta una exposición larga con el Hubble para verlos. En el año 2009, un telescopio en Mauna Kea determinó de manera fiable el corrimiento al rojo de un estallido en 8,2, correspondiente a seiscientos millones de años después de la gran explosión.

El fogonazo fue tan intenso, añade Berger, que podría haberse visto incluso a un desplazamiento al rojo de 15 o 20, a menos de doscientos millones de años de la gran explosión, muy cerca de la época en que las primeras estrellas empezaron a brillar. Y es más que verosímil, continúa, que esas mismas estrellas tan masivas fueran exactamente del tipo que origina estallidos de rayos gamma cuando mueren. De hecho, dice Berger, hay motivos para pensar que estas estrellas de la primera generación generaban estallidos de rayos gamma tan energéticos que, aun estando más lejos, parecerían incluso más brillantes que los que se han descubierto hasta ahora.

Además, a diferencia de los cuásares, que se dan solo en galaxias que contienen agujeros negros supermasivos, y de las galaxias visibles para el Hubble, que no son más que la punta brillante de un gran iceberg galáctico, los estallidos de rayos gamma son igual de violentos en las galaxias pequeñas que en

las grandes. En otras palabras, ofrecen una muestra mucho más representativa del universo en cualquier instante.

La desventaja, aclara Berger, es que el 99 por ciento de los estallidos de rayos gamma no apuntan hacia la Tierra, y del único estallido que los satélites detectan aproximadamente cada día, tan solo una minúscula parte se encuentra a alto corrimiento al rojo. Reunir una muestra representativa de los estallidos que tienen lugar a desplazamientos al rojo extremos podría llevar una década o incluso más, y Swift seguramente no va a durar tanto. En el mejor de los casos, indica, se debería lanzar otro satélite que le sucediese, para pasar las coordenadas de los estallidos al telescopio James Webb o a los instrumentos en tierra de 30 metros que se espera que entren en funcionamiento la década que viene. Hasta ahora, ninguna de las propuestas en este sentido ha recibido luz verde, ni por parte de la Agencia Espacial Europea ni de la NASA.

De todos modos, una vez el telescopio James Webb y la futura generación de telescopios terrestres gigantes empiecen a observar, los cazadores de cuásares, los muestreadores de galaxias y los que buscan resplandores delatores de los estallidos de rayos gamma en otras longitudes del espectro electromagnético podrán catalogar objetos mucho más débiles y viejos que los actuales. Su trabajo contribuirá a determinar con precisión qué pasaba en el universo primitivo.

Mientras tanto, los radioastrónomos aguardan la llegada de instrumentos como la Red de Campo Ancho Murchinson (MWA, por sus siglas en inglés) en Australia, la Red de Precisión para Explorar la Época de la Reionización (PAPER) en Sudáfrica, la Batería de Telescopios del Kilómetro Cuadrado (SKA), repartido entre ambos países, o la Red de Baja Frecuencia (LOFAR), con antenas situadas en varios países europeos, para cartografiar la lenta desaparición de las nubes de hidrógeno neutro durante los primeros mil millones de años de historia cósmica. El propio hidrógeno emite ondas de radio, así que, en principio, será posible observar esa emisión en distintas épocas —cada una desplazada hacia el rojo en diferente magnitud, en función de la distancia a que se encuentra— y obtener instantáneas del hidrógeno a medida que la radiación de alta energía lo carcome paulatinamente y las imágenes van avanzando en el tiempo. Finalmente, los astrónomos recurrirán a la Gran Red Milimétrica/Submilimétrica de Atacama (ALMA), en el desierto del altiplano chileno, para buscar monóxido de carbono y otras moléculas que marcan las nubes interestelares donde nació la segunda generación estelar.

La detección de la radiación residual de la gran explosión, en el año 1965, supuso un revulsivo para el estudio de la historia del universo, desde su nacimiento hasta el día de hoy. Todavía queda mucho que aprender, pero hay razones más que suficientes para creer que, de aquí al año 2015, en el sexagésimo aniversario de aquel descubrimiento, se podrá finalmente despejar muchas de las incógnitas.

PARA SABER MÁS

The dark age of the universe. Jordi Miralda Escudé en *Science*, vol. 300, págs. 1904-1909, 20 de junio de 2003. **arxiv.org/abs/astro-ph/0307396**

The first stars. Volker Bromm y Richard B. Larson en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 42, págs. 79-118, 19 de mayo de 2004.

The first stars in the universe and cosmic reionization. Rennan Barkana en *Science*, vol. 313, págs. 931-934, 18 de agosto de 2006. **arxiv.org/abs/astro-ph/0608450**

James Webb Space Telescope: **jwst.nasa.gov/science.html**

EN NUESTRO ARCHIVO

Estrellas primigenias. Richard B. Larson y Volker Bromm en *IyC*, febrero de 2002.

La edad oscura del universo. Abraham Loeb en *IyC*, enero de 2007.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor

(*) Disponible solo en formato digital

MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)

(*) Disponible solo en formato digital

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€



BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar su pedido:
Teléfono: (34) 934 143 344
A través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

OCEANOGRAFÍA

PREOCUPACIÓN POR EL CORAL

J. E. N. Veron, el descubridor de más del veinte por ciento de las especies de coral del mundo, teme que los problemas de los arrecifes sean mucho más graves de lo que se cree

Iain McCalman

Sir David Attenborough, el famoso naturalista, permanece de pie ante el atril de la Real Sociedad de Londres, el 6 de julio de 2009, a punto de llevar al estrado al conferenciante de aquella tarde. Un murmullo de expectación recorre la audiencia, a la espera de que empiece la ponencia «¿Se halla al borde de la desaparición la Gran Barrera de Coral?» Entonces, Sir David presenta a J. E. N. Veron, de 64 años de edad y por entonces director científico del Instituto Australiano de Ciencias Marinas. «Voy a llamarle Charlie», dice Sir David con una amplia sonrisa, «un apodo derivado de su obsesión, compartida con el Sr. Darwin, por el mundo natural». Sir David nos anuncia así que estamos a punto de escuchar al Charles Darwin de nuestros días.

Muchos de los científicos presentes en la sala ya están al corriente de la pertinencia de la comparación: hay un extraordinario parecido y unos estrechos vínculos intelectuales entre el conferenciante y el más importante de los miembros que la Real Sociedad haya tenido nunca. Todos los amigos de Charlie Veron saben también que se ha ganado una reputación internacional como científico, igual que Darwin, sin perder la independencia, la curiosidad insaciable y el amor apasionado por la naturaleza. Charlie, afirma Sir David, es una de las mayores autoridades científicas sobre corales y arrecifes coralinos. Ha descubierto y descrito más del veinte por ciento de las especies de coral conocidas, esos diminutos invertebrados que, dotados de esqueletos de carbonato cálcico, suelen agregarse para formar comunidades gigantescas. También ha escrito autorizados catálogos de los corales de todo el mundo. Pero hoy —la voz de Sir David adopta un tono sombrío—, Charlie viene con un cometido distinto: demostrarnos que los arrecifes coralinos son la clave para conocer los cambios desconcertantes que hemos desencadenado en el clima. Quizás él pueda responder a la pregunta que nos tortura: ¿Nos revelan los arrecifes un futuro peor del que esperamos?

Al amainar los aplausos, Charlie sube al atril, una figura enjuta y bronceada vestida con una camisa roja y una chaqueta oscura. Con su ronca voz australiana, agradece la presentación de Sir David y empieza a explicar a un auditorio embelesado por qué la Gran Barrera de Coral de la costa australiana, la mayor de todo el mundo, y el resto de los arrecifes coralinos se enfrentan a una extinción masiva que quizá se produzca antes de que mueran los miembros más jóvenes de la audiencia.

La conferencia de Charlie, derivada de un libro publicado en 2008, *A reef in time: The Great Barrier Reef from beginning to end* («Un arrecife en el tiempo: la Gran Barrera de Coral, de principio a fin»), representa un viraje en la perspectiva y el tono de quien ha disfrutado tanto escribiendo sobre los arrecifes coralinos. Durante cuarenta años, el experto ha exaltado su sorprendente diversidad y complejidad. Ahora la audiencia escucha cómo concentra toda su inteligencia y pasión en vaticinar el Apocalipsis del arrecife. Resulta obvio el deseo por esca-

Adaptado de The reef: A passionate history, *por Iain McCalman, de acuerdo con Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, LLC.*



EL ARRECIFE HARDY se halla amenazado por el incremento de la temperatura marina y por la acidificación, al igual que otras partes de la Gran Barrera de Coral.

PETER WALTON, GETTY IMAGES

par a su propia predicción. Pero para tener alguna posibilidad de hacerlo, debe contestar primero a la gran pregunta de los escépticos: ¿Cómo lo sabe? Y a la cuestión cruda que le sigue: ¿Por qué debería importarnos?



Iain McCalman es profesor de historia en la Universidad de Sídney, miembro de la Real Sociedad Histórica y autor de *Darwin's Armada* (2009) y *The Seven Ordeals of Count Cagliostro* (2004).

UN CONOCIMIENTO NACIDO DEL DOLOR

Para responder, Charlie empieza por plantear las intrigantes divergencias de una misma especie de coral en diferentes lugares, algo que ha intentado desentrañar durante décadas. A tal fin, ha visitado centenares de arrecifes en ambos hemisferios, en la inmensidad de los océanos Pacífico e Índico. Ha buceado y recogido muestras en Japón, Filipinas, Indonesia y las islas Cocos (o Keeling) y también en lugares mucho más alejados, como Zanzíbar y el remoto atolón Clipperton, en el Pacífico oriental. Siempre ha viajado en barco, ha trabajado junto a la población local y ha pasado horas bajo el agua, observando y memorizando. Como resultado de todo ello, ha constatado que, a escalas de tiempo geológicas, el coral se ha mezclado para producir nuevas formas, nuevas conexiones entre antiguas variantes e incluso híbridos poco claros.

Al investigar la diversidad y evolución de los corales del mundo, Charlie se percató de la existencia de serios problemas, aún en un estado incipiente. Aquel descubrimiento tenía profundas raíces personales e intelectuales. Una tragedia le había golpeado durante su larga tarea de exploración. Igual que Darwin se había visto sacudido por la tensión doméstica y las pérdidas emocionales mientras se esforzaba por finalizar su teoría sobre la evolución, lo mismo le había sucedido a Veron. En abril de 1980, se hallaba trabajando en Hong Kong cuando recibió una llamada telefónica de su esposa, Kristy, para explicarle, horrorizada, que una de sus hijas, Noni, de diez años, había muerto ahogada en una cala mientras jugaba con una amiga. Doblegados por el dolor, Charlie y su esposa vieron trastornadas sus vidas y acabaron divorciándose, a pesar del apoyo mutuo que se prestaron para superar la tragedia.

Charlie desarrolló un profundo sentido sobre la fragilidad y contingencia de la vida humana y esta percepción se trasladó a su investigación, que culminó con su libro de 1995, *Corals in space and time* («Corales en el espacio y el tiempo»). Escribirlo le obligó a investigar el destino de los arrecifes coralinos en el pasado y el presente. Revisó los datos sobre extinciones previas y acumuló abundante información sobre el efecto de los cambios en el nivel del mar, el estrés térmico, la depredación por la estrella corona de espinas y las alteraciones en la concentración de nutrientes provocadas por el hombre. Todo ello contribuyó a desarrollar su preocupación por la salud de la Gran Barrera de Coral y otros arrecifes del mundo.

Irónicamente, el libro le proporcionó a Charlie un resurgir personal, la oportunidad de una segunda historia de amor, en esta ocasión con Mary Stafford-Smith, la científica que editó el libro y se convirtió en su nueva pareja. Charlie y Mary empezaron a considerar la posibilidad de otro libro sobre corales dirigido al gran público, con fotografías a todo color y editado en gran formato. Tenía como objetivo «abrir los ojos del mundo ante la urgente necesidad de conservar los corales», explica a la audiencia. Era la plasmación de una nueva misión conjunta, destinada a «ganarse tanto los corazones como las mentes». Unos 70 fotógrafos submarinos cedieron gratuitamente su trabajo y el dibujante Geoff Kelly realizó bellos dibujos e ilustraciones. Charlie puso al alcance del lector una información enciclopédica. En octubre de 2000 se presentaron los tres volúmenes de *Corals of the world* («Corales del mundo») durante el Simposio Internacional sobre Arrecifes Coralinos, en Bali, donde el mensaje sobre la degradación y la fragilidad de estos ecosistemas se unió a una alarma mundial creciente.

Charlie, conservacionista instintivo, se había sorprendido durante la década de los setenta por el daño que causaba la estrella corona de espinas al alimentarse del coral. Estaba convencido de que su abundancia había aumentado debido a la sobrepesca de sus depredadores naturales y que la supervivencia de los millones de larvas liberadas anualmente a las corrientes marinas se veía favorecida por los niveles crecientes de contaminación. Pero lo que le hizo enfurecer fue el modo en que los intereses de la industria turística y de los políticos, así como la cobardía de las burocracias gubernamentales, lograban disuadir a los científicos de estudiar el problema. Fue el inicio del proceso, hoy ubicuo, por el que los investigadores perdieron la libertad para escoger sus temas de estudio o buscar sus propias respuestas.

BLANQUEO MASIVO

Volviendo la vista atrás, Charlie reconoce que, como la mayor parte de su generación, había asumido que los océanos eran infinitos y el mundo marino indestructible, incluida la vasta y bastante bien gestionada región del Parque Natural de la Gran Barrera de Coral. El hecho de que la región central del Indo-Pacífico actuara como la principal fuente de biodiversidad para los ecosistemas coralinos del planeta siempre había despertado inquietud, dada la ausencia de protección legal de esta. Sus amigos aficionados al buceo le habían insistido en que visitara los espectaculares arrecifes del este de Indonesia, pero cuando finalmente lo hizo, a principios de 1990, ya era demasiado tarde. Los arrecifes que antes se extendían a lo largo de miles de kilómetros habían quedado reducidos a escombros.

Charlie había presenciado por primera vez el blanqueo del coral en la Gran Barrera frente a la isla de Palma, a principios de los años ochenta del siglo XX, una pequeña agregación de esqueletos blancos que fotografió como una curiosidad. «Y luego fui testigo de un episodio terrible de blanqueo... donde todo se

EN SÍNTESIS

Gracias a exhaustivos estudios realizados por todo el globo, J. E. N. Veron ha descifrado la evolución de los corales, un proceso que ha tenido lugar durante millones de años en todos los océanos del planeta.

Sus descubrimientos también han revelado el modo en que el calentamiento y la acidificación del mar provocados por el cambio climático están causando el blanqueo del coral y su muerte.

El investigador incita a la población a que divulgue la historia del deterioro de los corales, como última oportunidad para evitar que los arrecifes de todo el mundo desaparezcan.

vuelve blanco y muere. En ocasiones solo afecta a los corales ramificados de crecimiento rápido, pero en otras se trata de una visión horrorosa; ejemplares de cuatrocientos, quinientos, seiscientos años de edad también mueren.»

El primer episodio a gran escala se produjo entre 1981 y 1982. El siguiente se dio entre 1997 y 1998 y afectó a los arrecifes de más de cincuenta países, incluidos los de las aguas cálidas del mar de Arabia. En la Gran Barrera de Coral, el fenómeno coincidió con las temperaturas más elevadas jamás registradas. Durante un episodio aún peor, entre 2001 y 2002, se confirmó la vinculación del blanqueo con los ciclos climáticos de El Niño. Los corales, especialmente vulnerables a los aumentos de temperatura y de iluminación, estaban alertando a los científicos sobre el cambio climático.

Las investigaciones de Charlie le permitieron deducir que, durante los ciclos climáticos de El Niño, los delicados corales de las aguas superficiales de la laguna de la Gran Barrera, ya expuestos a temperaturas inusualmente elevadas a causa de los gases de efecto invernadero, recibían la influencia de una masa de agua oceánica conocida como la «charca caliente del Pacífico». Cuando los corales experimentan una temperatura dos o tres grados superior a la máxima que pueden resistir (31 ºC en las especies de la Gran Barrera) y reciben una fuerte iluminación, el efecto resulta letal. Las algas simbióticas que viven en los tejidos del coral, al que le proporcionan su color y al que alimentan mediante la fotosíntesis, reaccionan liberando grandes cantidades de oxígeno, que pronto alcanza concentraciones tóxicas para los pólipos. El coral debe expulsar a las algas para no morir intoxicado, pero hacerlo lo matará de hambre. El resultado son filas y más filas de esqueletos del blanco más puro.

Charlie se disculpa ante la audiencia por haber pronunciado una conferencia tan desmoralizadora. «Usen su influencia», ruega. «Ayuden a difundir esta historia. No se trata de ficción. Es la realidad»

Los corales dañados pueden regenerarse si la temperatura del agua disminuye y su calidad permanece inalterada, pero la frecuencia e intensidad de los episodios de blanqueo es hoy tan elevada que la proporción de arrecifes destruidos se está incrementando con rapidez. Charlie predice que la mayor extensión y profundidad que está adquiriendo la charca caliente del Pacífico a causa del cambio climático significa que, para los corales, siempre será un año de El Niño.

EL PASADO PREDICE EL FUTURO

El experto confía en que alguna variante de alga, todavía por descubrir y mejor adaptada al estrés térmico, pueda establecer una nueva relación simbiótica con los corales. O que la energía adaptativa de los corales de crecimiento rápido, como *Acropora*, permita sobreponerse a la tasa de blanqueo. O que los corales presentes en los refugios umbríos de las frías y profundas paredes externas de los arrecifes o en el océano profundo sobrevivan e impulsen una futura renovación.

Pero el ascenso de la temperatura no es el único problema al que se enfrentan los corales. Quizá resulte imposible detener otras sinergias destructivas. Los arrecifes coralinos, precisa Charlie, representan archivos de la naturaleza. Son complejas bases de datos que han registrado los cambios climáticos durante millones de años, hasta el presente. Los restos fósiles recogen historias de extinciones masivas durante el pasado geológico e indican sus causas más probables. Tales archivos han demostrado que cuatro de las cinco extinciones masivas de corales sucedidas en nuestro planeta estuvieron relacionadas con modificaciones en el ciclo del carbono. Las provocaron cambios en la química del océano, en concreto, la acidificación del agua a causa de la absorción de dos de los principales gases de efecto invernadero, el dióxido de carbono y el metano.

Esos mismos gases son los culpables de la situación actual, aunque su mayor abundancia no puede atribuirse a la colisión de un asteroide o a las erupciones volcánicas, como en las catástrofes anteriores. Nosotros, los humanos, realizamos tal tarea al bombear a la atmósfera gases de efecto invernadero a un ritmo sin precedentes. Los océanos, el sumidero planetario de dichos gases, ya han acumulado un tercio de la cantidad que pueden albergar y amortiguar químicamente. La inevitable acidificación, que presagia la destrucción de la vida antes de que esta aparezca, ya se ha iniciado. Al final, quizás antes de 2050, alcanzaremos un nivel de acidez capaz de provocar la disolución de los esqueletos coralinos. Las rocas carbonatadas, incluidos los arrecifes de coral, empezarán a disolverse «como un comprimido antiácido gigante», según describe Charlie.

El fitoplancton, alimento del diminuto krill y un elemento clave en la red trófica de los océanos meridionales, se verá igualmente afectado por la acidificación. ¿Quién sabe qué terribles consecuencias ecológicas se encadenarán? La sexta extinción en masa de la Tierra habrá llegado.

Charlie Veron, un hombre que ha vivido y trabajado la mayor parte de su vida en la Gran Barrera de Coral, se encuentra ante el tormento de tener que profetizar su destrucción. No sorprende que se sienta extremadamente triste. «Día tras día, estoy siendo testigo del desastre. Es como ver quemar una casa a cámara lenta. Se inicia el fuego y todo arde muy despacio. Así he venido presenciando la devastación del coral durante años.»

Recuerdo pocos momentos tan dolorosos como los últimos instantes de la conferencia de Charlie en julio de 2009, en aquella silenciosa sala repleta de científicos y ciudadanos. Dejando a un lado sus notas, se disculpa ante la audiencia, con su voz tensa y cansada, por haberles dado aquella charla desmoralizadora. Les urge a pensar sobre lo que habían oído.

«Usen su influencia», ruega. «Por el futuro del planeta, ayuden a difundir esta historia. No se trata de ficción. Es la realidad.»

PARA SABER MÁS

Corals of the world. J. E. N. Veron. Australian Institute of Marine Sciences, 2000.
It's time for ocean zoning. Tundi Agardy en *Scientific American*, junio de 2009.
Autoridad del Parque Marino de la Gran Barrera de Coral: **www.gbrmpa.gov.au**

EN NUESTRO ARCHIVO

La acidificación de los océanos. Scott C. Doney en *IyC*, mayo de 2006.

COSMOLOGÍA

Tras las huellas de la

Los astrónomos llevan cerca de veinte años estudiando el fondo cósmico de microondas desde la Antártida. Hace unos meses, un experimento obtuvo los que podrían ser los primeros indicios de las ondas gravitacionales generadas durante el nacimiento del universo

Robert Schwarz



EN EL POLO SUR, varios telescopios escudriñan las propiedades de la radiación cósmica de fondo. En primer plano, tras la gran pantalla protectora con forma de embudo que corona el edificio del Observatorio Martin A. Pomerantz, se encuentra la batería Keck. Al fondo se aprecia el edificio del experimento BICEP2. A la izquierda se encuentra el Telescopio del Polo Sur, con su espejo de diez metros.

inflación





Robert Schwarz es físico y astrónomo. Este año ha pasado su décimo invierno en la Antártida como parte del equipo de mantenimiento del instrumento SPUD/Keck, dedicado a estudiar las propiedades del fondo cósmico de microondas.

El universo, tal y como lo conocemos hoy, comenzó hace 13.800 millones años con la gran explosión, una afirmación que en la actualidad casi ningún científico pone en duda. El modelo cosmológico estándar se basa en tres hechos empíricos independientes entre sí: la expansión actual del universo, la abundancia de elementos químicos y la existencia del fondo cósmico de microondas.

Sin embargo, las observaciones también nos muestran que, a escalas cósmicas, nuestro universo es prácticamente «plano»; es decir, de geometría euclídea. Eso significa, por ejemplo, que los rayos de luz se propagan «en línea recta» y que los ángulos de un triángulo siempre suman 180 grados. Sin embargo, para alcanzar dicha geometría el cosmos tuvo que haber comenzado con una densidad de materia y energía muy concreta, denominada densidad crítica. Dado que las condiciones iniciales del universo pudieron haber sido cualesquiera otras, semejante situación se antoja extremadamente improbable.

Por otro lado, la distribución de materia y energía resulta muy homogénea a grandes escalas. La radiación cósmica de fondo nos revela que, en el universo actual, existen regiones que, sin haber estado nunca conectadas causalmente, presentan una densidad de energía muy similar. La distribución espacial de temperaturas se muestra tan uniforme que, en principio, tales zonas tendrían que haber estado inicialmente en contacto físico, algo imposible a la vista del tamaño actual del universo y del tiempo transcurrido desde la gran explosión. (En este sentido, la imagen de una gran explosión como origen puntual de todo lo que existe resulta engañosa.)

Los dos problemas mencionados reciben el nombre de «problema de la planitud» y «problema del horizonte», respectivamente. La hipótesis de la inflación cósmica, postulada en 1981 por el físico Alan Guth, ofrece una elegante solución a estas aparentes arbitrariedades. Según ella, justo después de la gran explosión el universo habría experimentado una expansión de enormes proporciones. En apenas una fracción de segundo, sus dimensiones habrían aumentado —dependiendo del modelo— en hasta 50 órdenes de magnitud; es decir, en un factor de 10^{50}. Se cree que el proceso inflacionario hubo de desencadenar intensas ondas gravitacionales. Cientos de miles de años más tarde, tales ondas habrían dejado un patrón de polarización sutil pero muy característico en la radiación de fondo. Hoy por hoy, la búsqueda de dicha señal constituye el mejor enfoque experimental para poner a prueba la hipótesis inflacionaria.

Las primeros signos de polarización en la radiación de fondo se observaron en 2002, en los datos del observatorio de microondas DASI, situado en el Polo Sur. Gracias a los revolucionarios avances en el desarrollo de detectores de microondas acaecidos durante los últimos años, en la actualidad contamos con una nueva generación de telescopios capaces de medir tales señales con una precisión sin precedentes.

EL FONDO DE MICROONDAS

Unos 380.000 años después de la gran explosión, cuando el universo se hubo expandido tanto que la materia se enfrió hasta los 3000 grados Kelvin, los núcleos atómicos (casi exclusivamente protones) se combinaron con los electrones del plasma y formaron los primeros átomos neutros. En consecuencia, la radiación electromagnética dejó de interaccionar casi por completo con la materia, por lo que comenzó a propagarse libremente por el universo. Los físicos se refieren a ese episodio diciendo que, en aquel momento, luz y materia «se desacoplaron».

EN SÍNTESIS

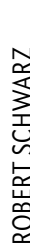
Postulada en los años ochenta del siglo pasado, la hipótesis de la inflación cósmica completa de manera muy elegante la teoría tradicional de la gran explosión.

Desde hace unos años, varios telescopios instalados en el Polo Sur buscan una impronta muy particular que la fase inflacionaria habría dejado en la radiación cósmica de fondo.

La colaboración BICEP2 anunció hace poco una señal compatible con las predicciones teóricas. Un detector complementario, la batería Keck, efectúa mediciones de referencia para corroborar los datos.

PÁGINAS ANTERIORES: ROBERT SCHWARZ

EL INSTRUMENTO SPUD/KECK se halla a un kilómetro de la base Amundsen-Scott. El gran embudo de aluminio protege el telescopio de las interferencias que llegan desde el suelo. La foto fue tomada en marzo de 2012, poco antes del atardecer polar. Puede verse al autor en el interior.



Las ondas electromagnéticas liberadas en aquel momento son las que hoy vemos en forma de radiación cósmica de fondo. En el momento en que se emitieron, su espectro correspondía al de un cuerpo negro (un emisor ideal) a una temperatura de unos 3000 grados Kelvin. No obstante, a medida que el universo se expandía, la longitud de onda de dicha radiación se «estiró», razón por la que hoy nos llega convertida en luz de microondas. En la actualidad, su espectro corresponde al de un cuerpo negro a una temperatura de 2,728 grados Kelvin.

Si medimos la temperatura del fondo cósmico con una resolución de 0,01 grados Kelvin, veremos una radiación perfectamente isótropa; es decir, idéntica en todas las direcciones del cielo. Sin embargo, a resoluciones del orden del microkelvin, comenzarán a aparecer irregularidades. Ello se debe a que, cuando la luz y la materia se desacoplaron, el campo de radiación no era del todo uniforme. A medida que el universo se expandía, surgieron pequeñas fluctuaciones en la densidad local de la materia y, con ello, también en la temperatura. En las zonas un poco más frías, la radiación se desacopló algo antes. Ello provocó pequeñas irregularidades en el campo de radiación, las cuales vemos hoy. Sus características aportan información muy valiosa sobre el universo primitivo.

Con todo, no debemos identificar las irregularidades observadas en la radiación de fondo tal y como aparecen en los mapas celestes de los satélites Planck, WMAP o COBE con estructuras de densidad reales. Dado que las fluctuaciones tuvieron lugar en todas las partes del espacio y que nosotros vemos la radiación de fondo a través de grandes distancias, sus inhomogeneidades se nos aparecen «sumadas» sobre toda la línea de visión.

Así pues, para interpretar el significado de las fluctuaciones del fondo cósmico hemos de recurrir a modelos. Estos nos dicen que dichas fluctuaciones solo pudieron originarse si la densidad del universo era lo suficientemente elevada, una condición en la que los expertos ven otro argumento a favor de la existencia de materia oscura. Vemos, pues, que el análisis de las propiedades de la radiación cósmica de fondo ha contribuido de manera muy notable al desarrollo de los modelos sobre la estructura a gran escala del universo. Los resultados mencionados hasta ahora se basan en el análisis de la intensidad de la radiación. Otra fuente de información, sin embargo, procede del estudio de la polarización de dichas ondas: si se encuentran polarizadas o no y, en su caso, de qué forma lo están.

Cierto patrón «lineal» de polarización, llamado modo E, se debe a la dispersión de los fotones por parte de los electrones del medio y al hecho de que, debido a las fluctuaciones de densidad, la distribución de materia no es del todo homogénea. Por otro lado, también puede generarse una componente de polarización «rizada», conocida como modo B, si durante la dispersión de los fotones se producen además perturbaciones espaciotemporales, como las provocadas por una lente gravitatoria o por ondas gravitacionales. Sin embargo, la cantidad de polarización debida al modo B —y, en particular, la atribuida a las ondas gravitacionales primigenias— resulta extremadamente pequeña y, por tanto, muy difícil de medir.

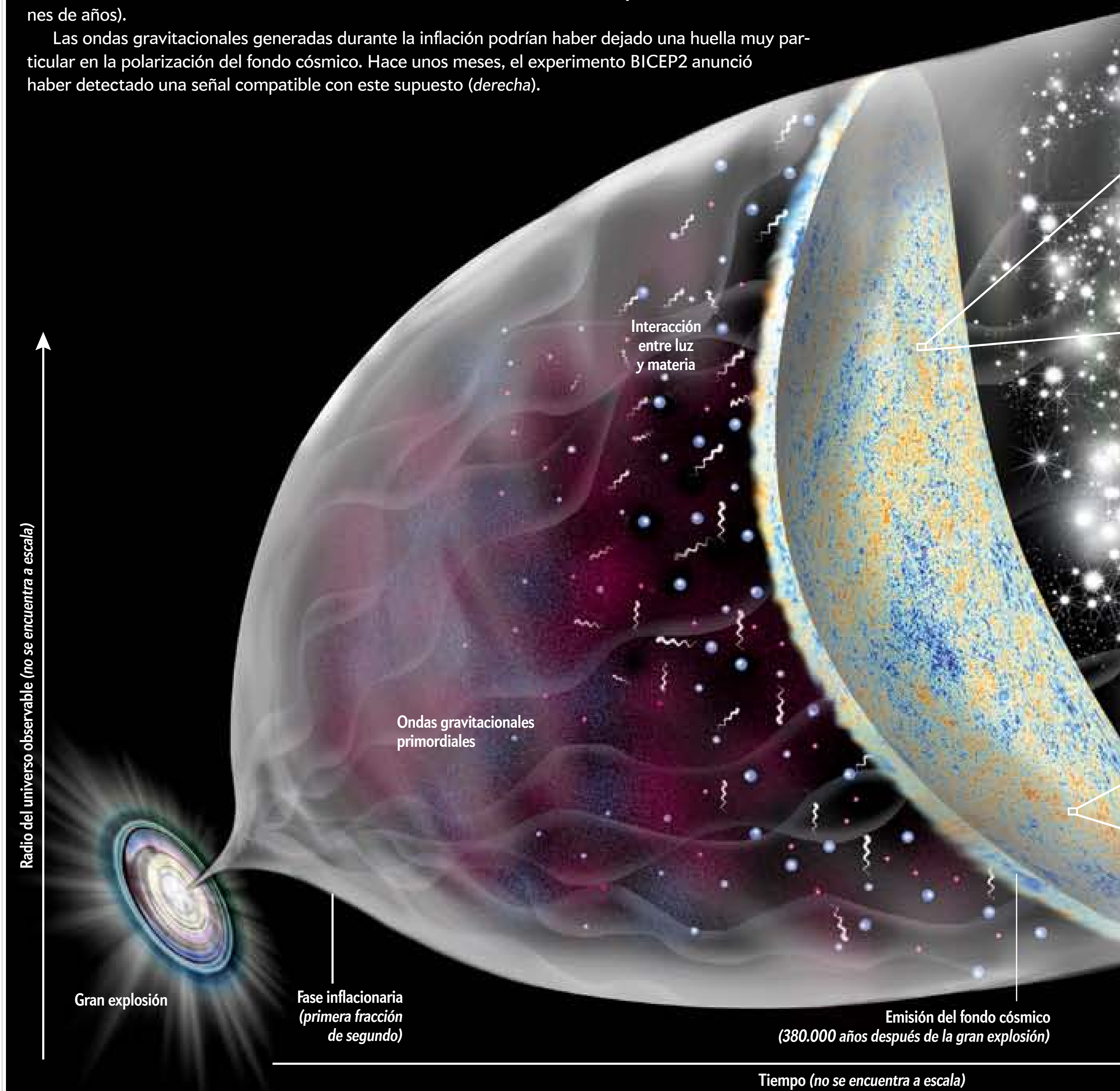
Continúa en la página 80

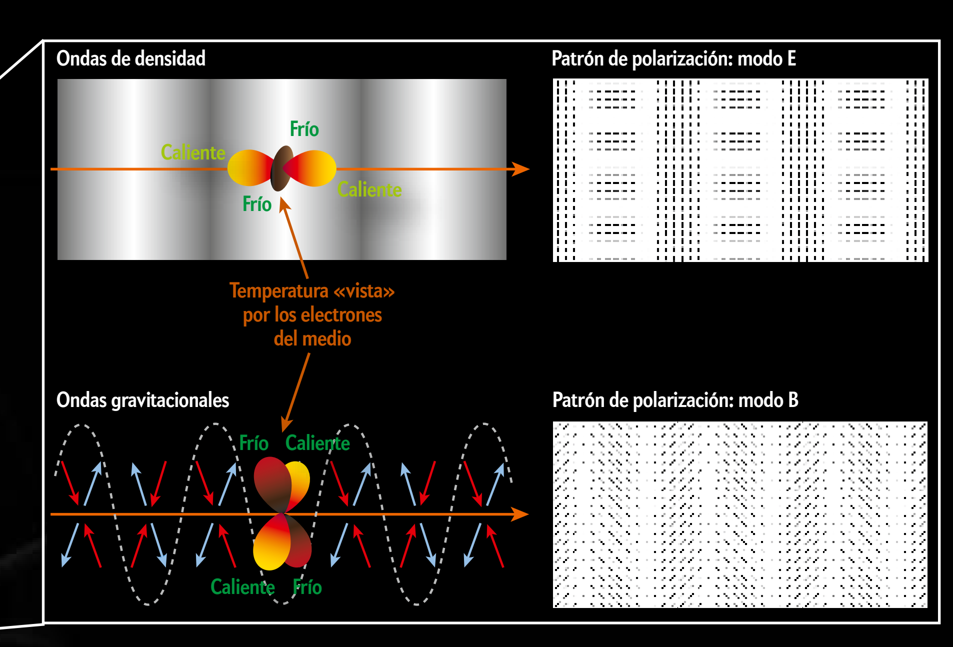
La impronta inflacionaria

Según la hipótesis de la inflación cósmica, el universo sufrió una expansión de enormes proporciones durante la primera fracción de segundo que siguió a la gran explosión. Dicho proceso habría producido una ingente cantidad de ondas gravitacionales, perturbaciones del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Tras ese estirón inicial, el universo habría continuado expandiéndose al ritmo, mucho más pausado, predicho por la teoría tradicional de la gran explosión.

Unos 380.000 años después de su nacimiento, el cosmos se enfrió lo suficiente para que protones y electrones se combinasen en los primeros átomos neutros. En ese momento, el universo se hizo transparente al paso de la luz. Los fotones liberados entonces son los que hoy componen el fondo cósmico de microondas. Aunque este se emitió mucho después de la fase inflacionaria, en términos cósmicos el universo era entonces extremadamente joven (su edad actual se estima en 13.800 millones de años).

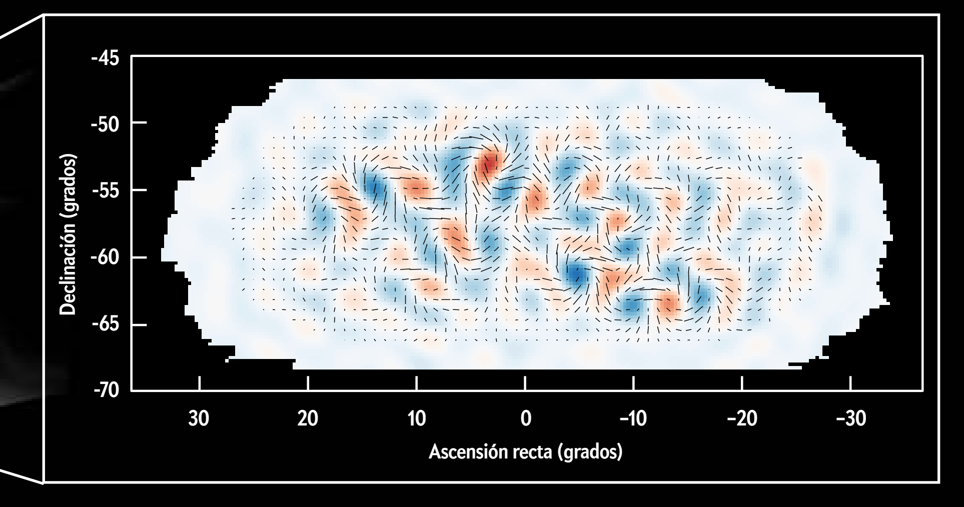
Las ondas gravitacionales generadas durante la inflación podrían haber dejado una huella muy particular en la polarización del fondo cósmico. Hace unos meses, el experimento BICEP2 anunció haber detectado una señal compatible con este supuesto (*derecha*).





Los fotones de la radiación de fondo son dispersados y polarizados por los electrones del medio. Dicho medio puede sufrir perturbaciones locales provocadas por dos tipos de ondas: de densidad (*arriba*) y gravitacionales (*abajo*).

Las ondas de densidad (*escala de grises; la flecha naranja indica el sentido de propagación*) inducen en el fondo cósmico un patrón de polarización «lineal» (modo E). Las ondas gravitacionales estiran (*flechas azules*) y comprimen (*flechas rojas*) el espacio en el plano perpendicular a su dirección de propagación (*flecha naranja*); ello genera un patrón de polarización «rizado» (modo B).



Formación de las primeras estrellas y galaxias *(unos 500 millones de años después de la gran explosión)*

El experimento BICEP2 ha obtenido los primeros indicios de modos B compatibles con la existencia de ondas gravitacionales primigenias. La gráfica muestra, en coordenadas astronómicas, la distribución celeste de dicha señal. La longitud de las líneas es proporcional a la magnitud del efecto en cada punto; los colores indican su sentido: horario (*rojo*) y antihorario (*azul*).

STERNE UND WELTRAUM (infografía); COLABORACIÓN BICEP2 (patrones de polarización y señal)

Viene de la página 77

ASTRONOMÍA DE MICROONDAS

Los astrónomos llevan cinco décadas estudiando el fondo cósmico de microondas. Hacerlo con telescopios terrestres, sin embargo, requiere emplazarlos en localizaciones muy particulares. Ello se debe a que las moléculas de agua presentan una fuerte absorción en esa zona del espectro (razón por la cual las microondas resultan tan eficientes en la cocina). Por tanto, los instrumentos astronómicos deben evitar el vapor de agua atmosférico.

Si no tenemos la posibilidad de escapar de la atmósfera con satélites o globos a gran altitud, la observación en áreas elevadas y secas ofrece una alternativa. Entre ellas destacan las zonas frías, ya que la cantidad de vapor de agua que admite el aire disminuye con la temperatura, un fenómeno que conocen bien los habitantes de Centroeuropa, donde la humedad durante el invierno resulta mucho menor que en verano.

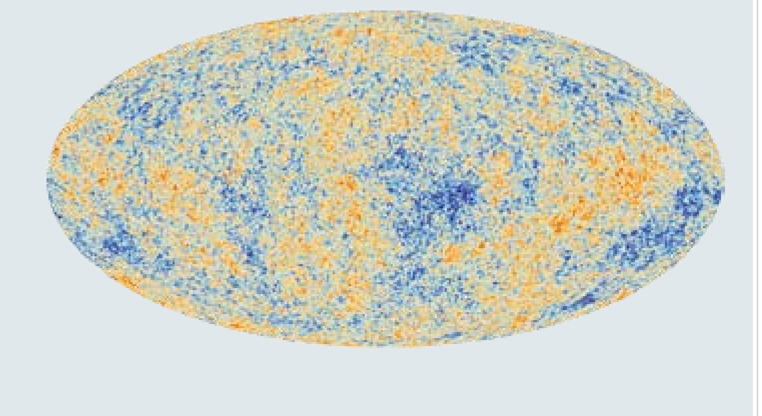
El Polo Sur constituye un lugar de observación ideal para los astrónomos. Aunque se encuentra a 2910 metros sobre el nivel del mar, desde un punto de vista barométrico sus condiciones resultan similares a las que existen en Europa a entre 3100 y 3600 metros de altitud. (Dado que el aire frío es más denso, el Polo Sur, con sus 2910 metros, se «eleva» mucho más allá en la capa de aire que una región a la misma altitud en latitudes templadas.) En la Antártida, la temperatura media anual se sitúa justo por encima de los 50 grados Celsius bajo cero, si bien en invierno puede caer hasta los 82 grados negativos. En tales condiciones, la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera es diez veces menor que la que hay en el desierto de Atacama, una de las regiones más secas del planeta.

En suma, el polo sur geográfico nos brinda un lugar idóneo para la astronomía de microondas. Existe en el continente helado un lugar que, al menos en principio, sería aún más favorable desde el punto climático: la meseta Domo A, unos 1000 metros más alta. Sin embargo, dicha región no se muestra tan accesi-

FLUCTUACIONES DE DENSIDAD

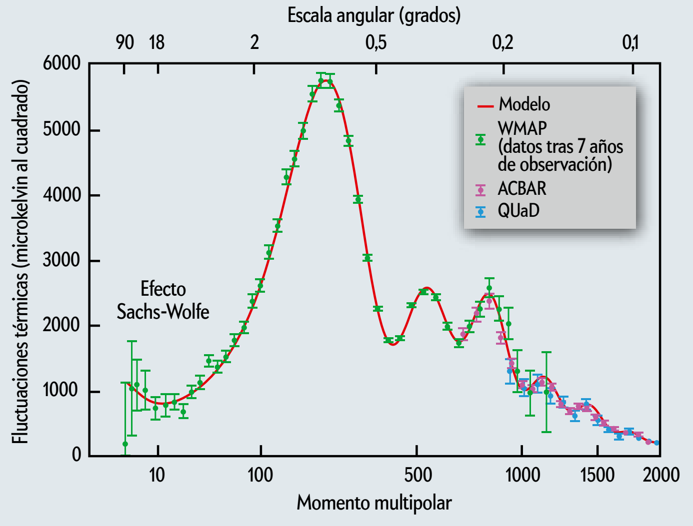
Temperatura del fondo cósmico

La imagen global más precisa de la radiación cósmica de fondo fue obtenida el año pasado por el satélite Planck, de la ESA. Tras eliminar las interferencias provocadas por otras fuentes astronómicas, emerge un mapa del cielo (*arriba*) en el que pueden verse las diminutas fluctuaciones (*colores*) que motean la temperatura de dicha radiación. Unos 380.000 años después de la gran explosión, los protones y los electrones del plasma se combinaron para formar los primeros átomos neutros. El universo se comportaba entonces de manera similar a un líquido, en el que las fluctuaciones de densidad se propagaban como ondas acústicas. Ello condujo a las diferencias de temperatura observadas en el fondo cósmico.



Para investigar el estado del universo primigenio, los cosmólogos calculan el «espectro de potencias» de dichas fluctuaciones, una técnica que permite analizar su distribución angular en el cielo (*gráfica*). El espectro de potencias se representa en función del momento multipolar, un parámetro que codifica la escala angular a la que tienen lugar las fluctuaciones.

Al simular el espectro de potencias para diferentes combinaciones de los parámetros cosmológicos, se obtienen unos valores u otros para los máximos que lo caracterizan. Así, al ajustar la posición del primer máximo con los datos experimentales, puede deducirse que la geometría del universo es aproximadamente euclídea. Los mismos datos permiten inferir también otras cantidades, como la edad del universo, la constante de Hubble, la densidad total del cosmos o las densidades respectivas de materia ordinaria, materia oscura y energía oscura.



Si la materia y la radiación de fondo se hubiesen distribuido de manera uniforme, la mayor parte del espectro se encontraría desplazado hacia momentos multipolares bajos, algo que no se observa. Entre otros efectos, las diferencias en el potencial gravitatorio causadas por las fluctuaciones de densidad provocaron que, en zonas con un potencial mayor, los fotones se desplazasen hacia el rojo. Dicho fenómeno, conocido como efecto Sachs-Wolfe, domina las fluctuaciones a escalas angulares grandes.

ESA/COLABORACIÓN PLANCK (*mapa*); D. L. LARSON ET AL./UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS/SuW (*gráfica*)

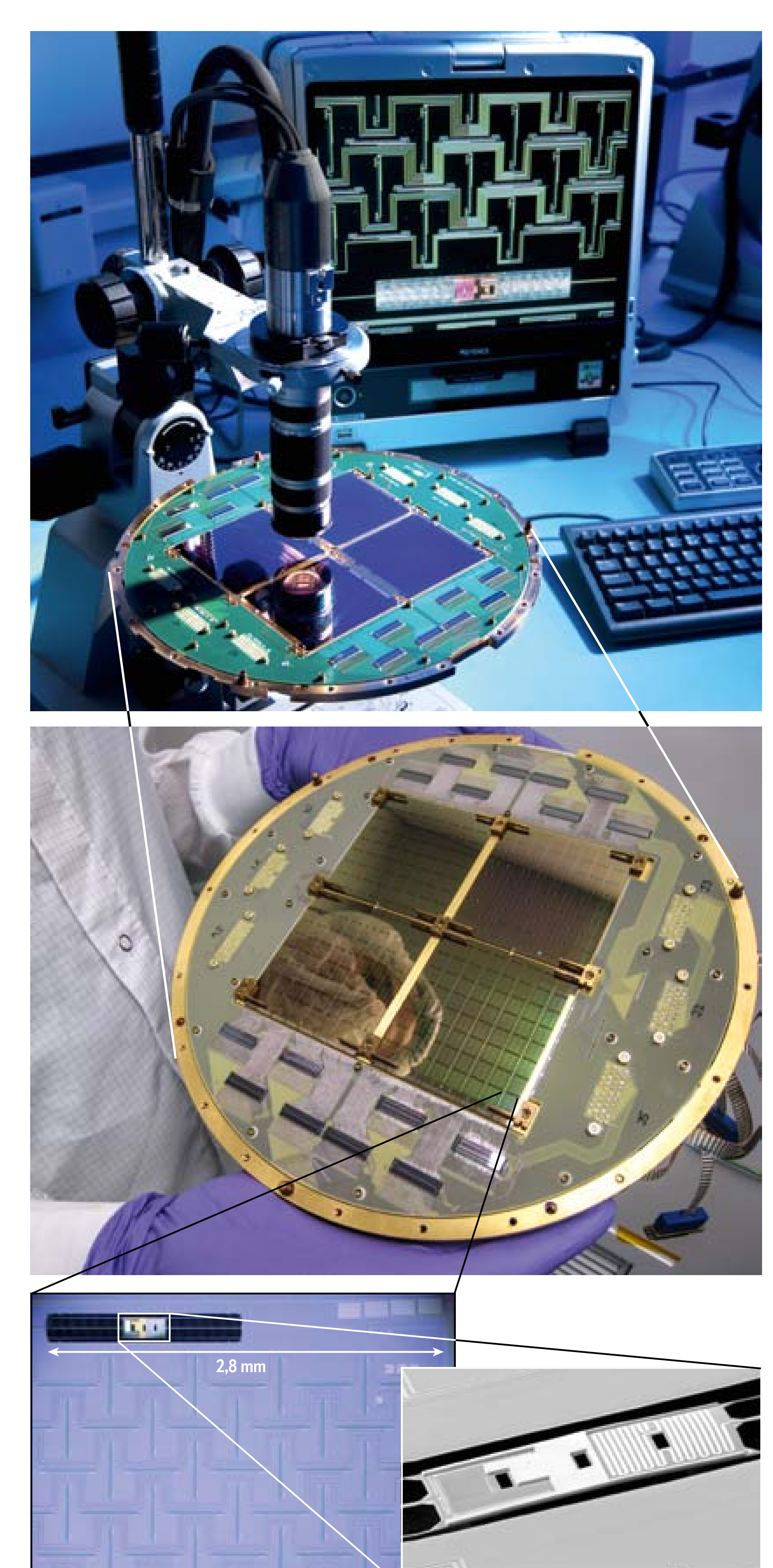
ble. Con todo, China intentará emplazar allí una estación en los próximos años.

El Polo Sur, en cambio, goza de varias ventajas desde el punto de vista logístico. La base Amundsen-Scott cuenta con personal durante todo el año, a pesar de que solo puede accederse a ella durante los tres meses y medio del verano antártico. Otra de sus virtudes reside en el hecho de que, al explorar el cielo desde esta localización, el área observada permanece a la misma altura sobre el horizonte durante todo el año. Ello elimina, entre otras, las correcciones relativas al cambio de las masas de aire en la línea de visión. Además, permite realizar observaciones durante las 24 horas del día. El Polo Sur, sin embargo, no resulta muy adecuado para las observaciones en el óptico, ya que existe una capa de inversión muy intensa cerca de la superficie, lo que acarrea turbulencias. Y las auroras, casi constantes, también dificultan las observaciones en la franja visible del espectro.

LA BATERÍA KECK

La astronomía de microondas lleva desarrollándose en la Antártida cerca de 20 años. El primer telescopio destinado a este fin fue Python, construido a principios de los noventa para observar el fondo cósmico de microondas. Al este le siguió Viper. A finales de 1999, con el objetivo de investigar el fondo cósmico con técnicas de interferometría, se instaló el telescopio DASI. Fue durante estas observaciones cuando, de manera fortuita, los astrónomos se toparon por vez primera con indicios de polarización en el fondo cósmico. Para buscar de manera sistemática los modos B, entre 2005 y 2006 entraron en funcionamiento otros dos telescopios: QUaD y BICEP1, cada uno de los cuales operó durante tres años.

El siguiente experimento, BICEP2, tomó datos entre 2010 y 2012. A mediados del pasado mes de marzo, la colaboración responsable del experimento hizo públicos sus resultados: una señal de modos B justo allí donde se esperaba encontrar la huella de la polarización causada por las ondas gravitacionales primigenias. En estos momentos, los investigadores se encuentran realizan-



AL MILÍMETRO: El corazón del instrumento Keck se halla en su plano focal. Cada detector (*arriba*) consta de cuatro planchas (obleas de silicio grabadas, *centro*) de 76 milímetros de lado, las cuales contienen 64 pares de antenas (*abajo*). Su elevada precisión se ha conseguido gracias a la tecnología de bolómetros de transición abrupta (TES, por sus siglas en inglés).

BICEP/KECK/ANTHONY TURNER (JPL)

do mediciones de referencia con el telescopio de microondas más reciente instalado en Polo Sur. Originalmente llamado SPUD, hoy el instrumento se conoce como batería Keck. Se encuentra en funcionamiento desde 2011, en la montura original de DASI. Financiados por la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. y la Fundación Keck, del mismo país, su operación corre por cuenta de varias instituciones estadounidenses e internacionales.

Los resultados presentados hace unos meses se deben al notable progreso que durante la última década han experimentado los detectores de microondas. El experimento precedente, QUaD, aún operaba con bocinas de alimentación. Similares a una trompetilla, estas unidades de medición usaban como antena una rejilla (bolómetro de tela de araña) de dimensiones macroscópicas, la cual absorbía la radiación de microondas. Por su parte, los detectores de última generación funcionan con semiconductores y superconductores microscópicos grabados en obleas de silicio, como los chips de un ordenador. Esta técnica presenta la ventaja de que permite acomodar muchos más elementos de detección en un área reducida.

Desde un punto de vista estructural, la batería Keck resulta idéntica al experimento BICEP2, si bien cuenta con cinco detectores. Tres de ellos se encuentran en funcionamiento desde principios de 2011; los dos restantes se añadieron al año siguiente. Cada uno funciona como un ohmímetro de alta sensibilidad situado en el interior de un gran «termo», a fin de evitar la influencia de la temperatura exterior. Ello permite medir variaciones mínimas en la resistencia y, de esa manera, determinar con gran precisión la energía de la radiación que llega desde el espacio.

Para alcanzar la sensibilidad requerida, los chips detectores situados en el plano focal deben operar a unos 270 milikelvin, la temperatura de transición entre el estado normal y el superconductor. Cualquier variación en la temperatura del dispositivo

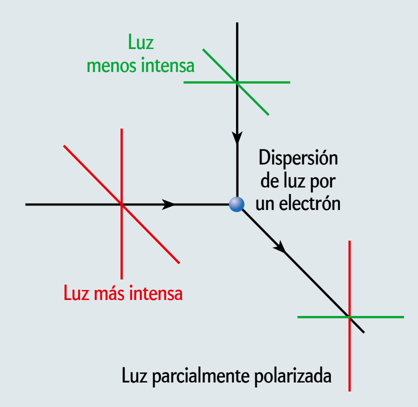
ONDAS GRAVITACIONALES

Polarización del fondo cósmico

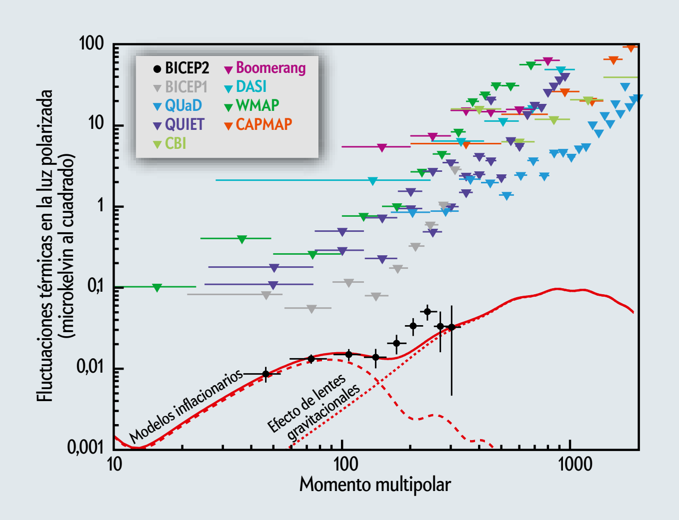
Los fotones que componen el fondo cósmico de microondas no solo se caracterizan por su temperatura, sino también por su polarización; es decir, por la dirección en la que vibra el campo electromagnético asociado. Al igual que la temperatura, esta magnitud constituye una fuente de información de gran valor sobre el universo temprano.

Cuando una onda de luz incide sobre un electrón, este comienza a vibrar y emite una nueva onda. En general, la polarización de la luz dispersada dependerá de la distribución de las intensidades y de la dirección de incidencia de los fotones originales (*esquema*). Las señales de polarización presentes en el fondo cósmico pueden clasificarse en dos tipos: un patrón «lineal», conocido como modo E, y otro «rizado», llamado modo B. El primero se generó como consecuencia de las fluctuaciones de densidad que tuvieron lugar en el universo primitivo. El segundo, en cambio, puede explicarse a partir del efecto de ondas gravitacionales o campos gravitatorios muy intensos.

Los modos E fueron observados en 2002 por el telescopio DASI, en la Antártida. La primera detección de modos B fue anunciada en julio de 2013 por los investigadores del Telescopio del Polo Sur. En aquel caso, sin embargo, la señal se atribuyó al efecto de lentes gravitacionales. Hace unos meses, el experimento BICEP2 obtuvo la primera señal de modos B compatible con la existencia de ondas gravitacionales generadas durante la inflación cósmica (*gráfica*).

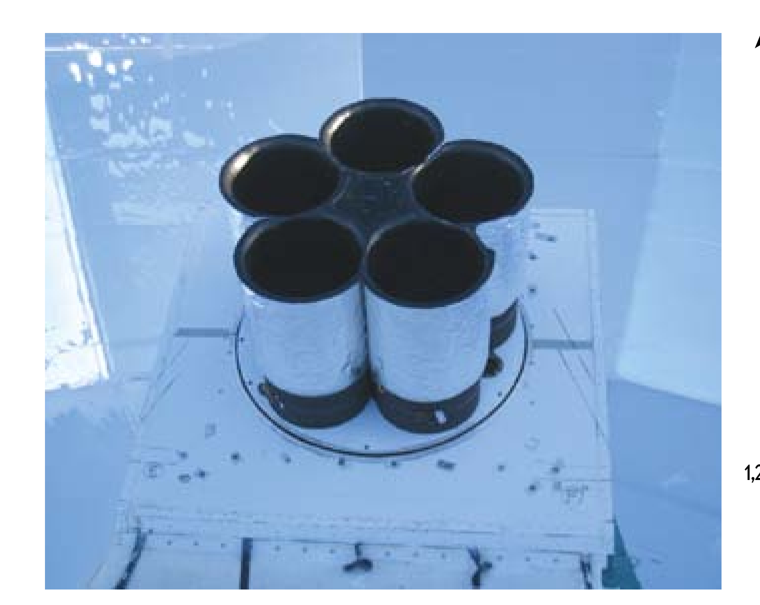


En este ejemplo, un electrón es irradiado con luz no polarizada procedente de diferentes direcciones. Los ejes perpendiculares (*rojo y verde*) representan el plano de oscilación de la luz; su longitud indica la intensidad. En la luz dispersada, la componente de oscilación vertical es más intensa que la horizontal, por lo que la onda estará parcialmente polarizada.

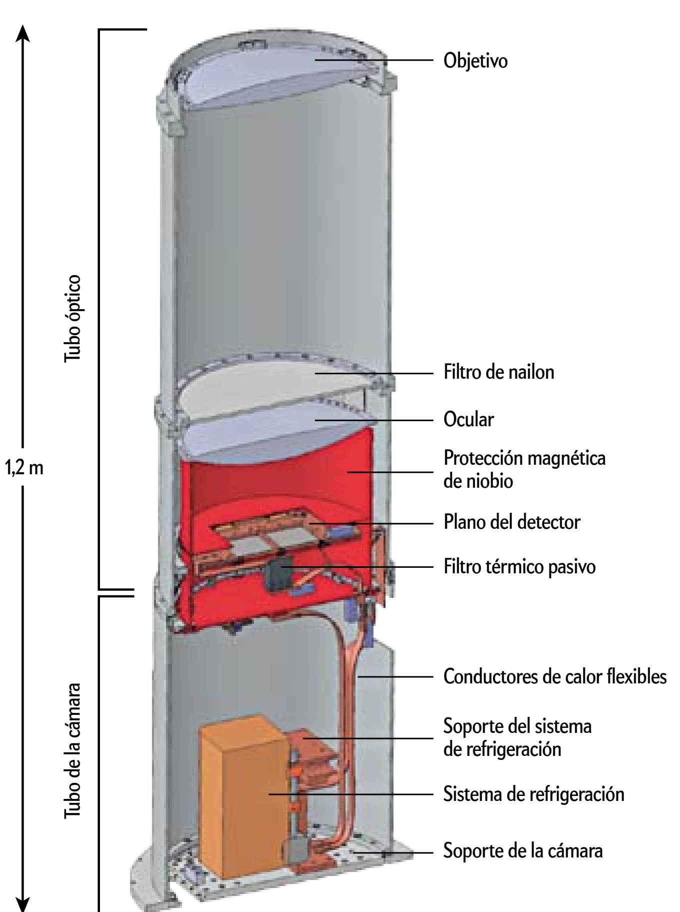


Espectro de potencias de los modos B según el experimento BICEP2 (*puntos negros*) y límites obtenidos en el pasado por otros experimentos (*triángulos de colores*). A los datos se han superpuesto dos predicciones teóricas (*rojo*): la fracción atribuida a la inflación cósmica (*línea discontinua*) y la contribución esperada a partir del efecto de lentes gravitacionales (*línea de puntos*).

STERNE UND WELTRAUM (*gráficos*); BICEP/KECK (*espectro de potencias*)



SPICE GIRLS: El instrumento SPUD/Keck fue rebautizado por los científicos como SPICE (por South Pole Inflationary Cosmology Experiment, o Experimento sobre Cosmología Inflacionaria en el Polo Sur), por lo que cada uno de los cinco detectores recibió el nombre de una de las Spice Girls. Tanto los detectores (ilustración) como el resto de los componentes electrónicos se encuentran en el interior, aislados del frío extremo. Desde el exterior solo pueden verse las fundas protectoras (*fotografía*), que también evitan las interferencias.



(debida, por ejemplo, a la radiación de microondas incidente desde el exterior) ejerce un efecto considerable sobre la resistencia del material, lo que permite medir energías extremadamente pequeñas. El hecho de que el detector funcione tan cerca del cero absoluto presenta además otra ventaja: el ruido de fondo de origen térmico causado por el propio dispositivo resulta muy bajo, lo que aumenta aún más su sensibilidad.

ENFRIAR A MILÉSIMAS DE KELVIN

Para alcanzar la temperatura de operación, gélida incluso para los estándares de la Antártida, los detectores se preenfrían hasta unos 3,2 grados Kelvin mediante tubos de pulsos. Se trata, en su sentido más amplio, de bombas de calor. Sin embargo, el gas de trabajo (helio) no se halla sometido a la acción de un pistón, sino a la de un compresor que, de manera alterna, ejerce presiones variables. La temperatura en el plano focal se reduce así hasta los 270 milikelvin gracias a una unidad de refrigeración que consta de tres etapas. La primera de ellas opera con helio 4; las otras dos, con helio 3.

Al igual que ocurre con el agua, la temperatura de ebullición del helio también depende de la presión atmosférica. En el vacío, esta es de unos 2 grados Kelvin, frente a los 4,2 kelvin a los que hierve a la presión atmosférica a nivel del mar. Por su parte, el punto de ebullición del helio 3 es del orden de pocos milikelvin en el vacío y de 3,2 kelvin en condiciones normales.

El vacío de la unidad de refrigeración se genera con carbón activado, que absorbe por completo el helio en fase gaseosa. Mediante la aplicación de un pequeño voltaje, el helio se libera de nuevo en forma de gas y condensa en los tubos de pulsos, que se encuentran a 3,2 grados Kelvin. Al evaporarse, enfría la siguiente etapa hasta unos 2 kelvin. A lo largo de la segunda y tercera etapa de enfriamiento (las cuales proceden igual que la primera, pero con helio 3), la temperatura en el plano focal se reduce primero hasta unos 250 milikelvin, un poco más baja que



CERCA DEL CERO ABSOLUTO: La unidad de refrigeración de los detectores funciona en tres etapas. La primera (*izquierda*) opera con helio 4; las otras dos (*centro y derecha*) con helio 3.

ROBERT SCHWARZ (SPICE); BICEP/KECK/STERNE UND WELTRAUM (*detector*); BICEP/KECK (*unidad de refrigeración*)

la temperatura de transición al estado superconductor. En las condiciones del experimento, aportar calor y controlarlo resulta más fácil que extraerlo. Por ello, los planos focales se calientan después hasta los 270 milikelvin, temperatura que se mantiene constante durante la fase de observación.

La temperatura de trabajo puede mantenerse estable durante 42 horas. Después, debe ponerse en marcha el siguiente ciclo de enfriamiento, de entre cinco y seis horas de duración. Dado que los tubos de pulsos constituyen un sistema de refrigeración cerrado, no hace falta reponer el helio (o el nitrógeno) líquido, como ocurría con BICEP2 y los experimentos previos. En un lugar como la Antártida, ello facilita de manera considerable la logística necesaria para mantener operativo el instrumento.

ALTA TECNOLOGÍA

Con todo, el corazón de la batería Keck lo constituyen los detectores situados en el plano focal. Una unidad detectora se compone de cuatro microchips con 64 píxeles. En cada píxel hay dispuestas dos antenas perpendiculares entre sí, la cuales miden la polarización de la radiación incidente. El diseño responde a una longitud de onda de 2 milímetros (lo que corresponde a una frecuencia de 150 gigahercios), si bien desde este año dos de los detectores

INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

¿Inflación o polvo?

Dos estudios recientes señalan una posible explicación alternativa a los datos de BICEP2

LICIA VERDE

Los resultados anunciados en marzo por la colaboración BICEP2 resultan compatibles con la huella dactilar que la inflación cósmica podría haber dejado en el fondo de microondas. De confirmarse, nos hallaríamos ante un descubrimiento histórico. Pero ¿admiten los mismos datos una explicación más prosaica?

A finales de mayo, los investigadores de la Universidad de California Michael J. Mortonson y Uroš Seljak publicaron en el repositorio de artículos científicos arXiv un análisis que ponía en duda la interpretación de los datos en términos de ondas gravitacionales primigenias. Días después, Raphael Flauger, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, y sus colaboradores hacían público, también en arXiv, otro estudio con conclusiones similares. Twitter y numerosos blogs de investigadores y aficionados a la cosmología se han llenado de discusiones al respecto. Examinemos por qué.

Después de todo el esfuerzo invertido en detectar la —diminuta— señal de polarización de los modos B en el fondo de microondas, el trabajo aún no ha concluido. Ahora empieza otro: el de interpretación de los resultados. El gran problema se debe a que la Vía Láctea contiene polvo cósmico, electrones libres y un campo magnético propio, una combinación de factores que produce emisión polarizada en las mismas frecuencias en las que se observa el fondo cósmico de microondas.

Promediada en todo el cielo, la emisión galáctica resulta mucho mayor que cualquier señal de polarización de origen primordial. No obstante, una y otra pueden distinguirse de dos maneras. Por un lado, el fondo de microondas emite como un cuerpo negro, mientras que la galaxia no. Por otro, el fondo cósmico es muy uniforme en todas las direcciones del cielo; las emisiones de la Vía Láctea, en cambio, suelen concentrarse en determinadas zonas, como el disco galáctico. Así pues, para separar ambas señales caben dos opciones: realizar medidas en distintas frecuencias, o bien seleccionar un área del cielo en la que la contaminación galáctica sea mínima.

El experimento BICEP2 observó una región celeste conocida como el «hoyo sur», una ventana libre hacia el cosmos. Sin embargo, solo tomó medidas a una frecuencia: 150 gigahercios (GHz). El experimento previo, BICEP1, observó la misma zona a 100 GHz, aunque con menor sensibilidad. La combinación de ambos experimentos no basta para separar las señales cósmica y galáctica, por lo que los resultados de BICEP2 hubieron de complementarse con los obtenidos en el pasado por otros observatorios.

Hace unos años, el satélite WMAP registró datos de polarización en todo el cielo para frecuencias comprendidas entre 30 y 90 GHz. Aunque mucho más ruidosos que los obtenidos por BICEP2, los resultados de WMAP sí dan una buena idea de la contaminación debida al efecto de los electrones libres en el campo magnético de la galaxia.

Más problemática resulta la emisión polarizada del polvo. Cuando se anunciaron los resultados de BICEP2, no se disponía de observaciones a frecuencias más altas en las regiones dominadas por el polvo. El pasado 5 de mayo, sin embargo, la colaboración Planck hizo públicos sus resultados sobre dichas emisiones, aunque estas no correspondían a la región celeste estudiada por BICEP2. Por tanto, para cuantificar qué fracción de la señal de BICEP2 podría deberse al polvo galáctico, debemos recurrir a modelos.

Pero los modelos son... modelos. En su artículo, Flauger y sus colaboradores subrayaron las limitaciones del método empleado por el equipo de BICEP2 para sustraer la contaminación por polvo. Según este, la señal debida al polvo sería muy pequeña en la zona del cielo observada. No obstante, existen otras regiones en las que la fracción de polarización debida al polvo resulta mucho mayor, por lo que nada impediría que lo mismo ocurriese en el hoyo sur. Teniendo en cuenta todas estas limitaciones, podría suceder que toda la señal observada por BICEP2 no fuese más que un producto del polvo galáctico.

La hazaña lograda por la colaboración BICEP2 merece toda nuestra admiración y respeto. Su trabajo ha llegado a donde nunca nadie lo había hecho antes, al reducir el ruido ambiental e instrumental en ocho órdenes de magnitud. Tal vez nuestra galaxia haya sido cruel y haya disfrazado sus emisiones de polvo en forma de ondas gravitacionales primigenias. Pero también puede ocurrir que haya sido amable y que la región celeste explorada por BICEP2 no se encuentre demasiado contaminada.

La solución provendrá de observaciones a frecuencias más elevadas. Por fortuna, no faltan experimentos. Entre otros, el equipo de BICEP2 ya está en ello, y se espera que antes de Navidad Planck publique más datos. Los próximos meses prometen ser muy emocionantes.

Licia Verde *es profesora de investigación ICREA en el Instituto de Ciencias del Cosmos, centro mixto de la Universidad de Barcelona y el Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña, y profesora en el Instituto de Astrofísica Teórica de la Universidad de Oslo.*



LOGÍSTICA: Durante los tres meses y medio de verano, los aviones Hércules LC-130 constituyen la única conexión del Polo Sur con el mundo exterior. Materiales de construcción, suministros, personal y provisiones deben ser transportados por aire desde la base de McMurdo, situada en la costa a 1400 kilómetros de distancia. Debido a las gélidas temperaturas, los motores no pueden apagarse nunca. La estela de condensación que comienza a formarse en el suelo tras la aeronave dificulta sobremanera las labores de carga y descarga.

ROBERT SCHWARZ

operan con longitudes de onda de 3 milímetros (100 gigahercios). Unos chips semiconductores especiales, denominados bolómetros con sensor superconductor de transición abrupta (TES), recogen y amplifican la señal. Así pueden medirse las pequeñas diferencias de temperatura que surgen cuando los fotones son absorbidos y la energía liberada se convierte en calor.

Cada bolómetro posee tres partes principales: un absorbente, que acumula la energía que incide sobre él; un termómetro, que permite cuantificarla; y una conexión térmica, destinada a disipar de nuevo la energía y mantener el detector a la temperatura de trabajo. La lectura de los bolómetros tiene lugar mediante inducción. Para ello se emplean dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID), los cuales pueden medir con enorme precisión las pequeñas variaciones de un campo magnético. Los bolómetros TES permiten, además, aumentar de manera sustancial el número de píxeles. La batería Keck cuenta con 256 pares de antenas por detector. En cambio, el experimento previo, QUaD, funcionaba con 31 píxeles.

CONTINENTE DE SUPERLATIVOS

Aunque el Polo Sur cuenta con una buena logística, construir y mantener un telescopio en semejante emplazamiento no deja de plantear numerosos retos. La Antártida es un continente de superlativos: el más elevado, frío, seco y con más viento de todos. A la base Amundsen-Scott solo puede accederse entre finales de octubre y mediados de febrero desde Nueva Zelanda. Por tanto, la fase de construcción queda restringida a los meses de verano. En un día «caluroso» la temperatura no pasa de 20 grados Celsius negativos, y no es raro que baje hasta los 40 bajo cero.

Cualquier equipo que se desee adquirir ha de caber en un LC-130, un avión de transporte Hércules equipado con esquíes. La fase normal de observación comienza con la llegada del invierno (es decir, a mediados de febrero) y se prolonga hasta finales de octubre o principios de noviembre. Durante ese tiempo, la estación se encuentra aislada del mundo exterior: a las gélidas temperaturas, excesivas para los aviones, se suma la noche polar, de seis meses de duración.

Dado que la batería Keck fue concebida para medir el fondo de microondas, en teoría podríamos observar con ella durante todo el año. Sin embargo, los datos obtenidos durante el verano no son óptimos. Ello se debe a las temperaturas propias de la estación, más elevadas, y a la presencia de un mayor número de interferencias, como las provocadas por los dispositivos de radio. Por ello, los meses de estío se dedican a labores de mejora, mantenimiento y calibración del telescopio. A ello que se dedican en exclusiva entre cuatro y ocho científicos, además de otros investigadores de la estación.

En invierno, el personal de la base se reduce de unas 150 personas a 40 o 50. A cargo de la batería Keck queda un solo «invernante». Su misión consiste en mantener el telescopio en funcionamiento, lo que incluye realizar trabajos relacionados con la mecánica y la electrónica del sistema, la criogenia, los programas informáticos y de administración. Todo ello requiere una gran capacidad de improvisación, pues, como no podía ser de otra manera, las partes que suelen estropearse son aquellas para las que hay pocas o ninguna pieza de repuesto. Durante los últimos años ha habido cada vez más problemas con el desgaste de la montura del telescopio, ya que se trata del tercer instrumento (tras DASI y QUaD) que se instala en ella. Los trabajos en el exterior, que no pueden evitarse por completo, implican hacer frente a temperaturas de entre 60 y 80 grados Celisus bajo cero.

Además de la batería Keck, en la actualidad hay otro observatorio de microondas en funcionamiento: el Telescopio del Polo Sur. Su enorme espejo de diez metros le confiere una resolución mucho más alta, si bien su campo de visión es menor. Gracias a él, el año pasado se detectaron por primera vez los modos B producidos por el efecto de lentes gravitacionales. Ya están en marcha los planes para construir los telescopios de la siguiente generación. Así, BICEP3 deberá entrar en funcionamiento en 2015. El mismo año, el Telescopio del Polo Sur contará con un nuevo detector para buscar los modos B procedentes de las ondas gravitacionales primigenias.

La batería Keck aún deberá tomar datos durante 2015, una tarea que tal vez continúe en 2016. Tenemos derecho a estar expectantes. Verificar la huella dactilar de las ondas gravitacionales primigenias con otro experimento podría suponer el espaldarazo definitivo a la teoría de la inflación cósmica.

PARA SABER MÁS

Los artículos técnicos de la colaboración BICEP pueden descargarse en **www.bicepkeck.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

El universo inflacionario. Alan Guth y Paul Steinhardt en *IyC*, julio de 1984.
El universo inflacionario autorregenerante. Andréi Linde en *IyC*, enero de 1995.
La sinfonía cósmica. Wayne Hu y Martin White en *IyC*, abril de 2004.
La inflación a debate. Paul Steinhardt en *IyC*, junio de 2011.
Una ventana al primer instante del universo. Juan García-Bellido y Daniel G. Figueroa en *IyC*, diciembre de 2012.
Primera señal de ondas gravitacionales primigenias. Ron Cowen en *IyC*, mayo de 2014.

por Norbert Treitz



Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburgo-Essen.

Juegos con dimensiones

Ordenar grandes conjuntos de objetos en varias dimensiones permite obtener conclusiones sorprendentes sobre los miles de millones de personas que habitan en el planeta, los átomos que hay en una mancha de aceite o la cantidad de energía que produce el Sol

El número de habitantes de nuestro planeta supera ya los 7000 millones. ¿Hay alguna manera de concebir un número semejante?

Ni los mamíferos más evolucionados logran captar de un vistazo cifras demasiado grandes. Pero imagine que alguien le da a elegir entre varios montones: uno contiene 7000 millones de guisantes, otro quizá la mitad, otro el doble, uno con cuatro veces más y otro con solo una cuarta parte. ¿Podría distinguir a simple vista y con un par de cálculos elegantes el montón de los 7000 millones?

Como veremos, el número de dimensiones en que elijamos ordenar los guisantes resultará decisivo. Los filósofos clásicos ya se devanaron los sesos con la siguiente paradoja, también conocida como paradoja de *sorites*, o del montón: ¿a partir de qué número natural *n* forman *n* granos de arena un montón? Herbert Litschke, antiguo compañero mío en Duisburgo, propuso una vez en tono jocoso la siguiente solución: si necesitamos más de tres dimensiones, estamos ante un montón. Su respuesta puede tomarse más en serio de lo que él mismo pretendía en un principio.

Si asignamos a cada guisante un grosor de 5 milímetros, 7000 millones de ellos ordenados en una hilera (un montón unidimensional) alcanzarán una longitud de 35.000 kilómetros. Esa distancia equivale a unos 7/8 de la circunferencia terrestre. Así pues, nuestra cadena no se ajustaría a nuestro planeta en su parte más ancha, aunque sí a partir de los 29 grados de latitud norte o sur, aproximadamente. Aunque esto ya suena a algo más concreto, podemos preguntarnos qué experiencias sensoriales cabe aplicar a semejantes longitudes.

Las grandes distancias siempre se han medido por el tiempo necesario para recorrerlas. A pie, a caballo o en bicicleta, los intervalos temporales correspondientes se acomodan bastante bien a nuestra experiencia sensorial. En coche, tren o avión, un poco menos. Aceptemos que, en bicicleta, una velocidad razonable serían unos 20 kilómetros por hora. En tales unidades, la circunferencia terrestre «mide» unas 2000 horas; es decir, algo más de 83 días, poco más que el tiempo que necesitó el protagonista de la novela de Julio Verne para dar la vuelta al mundo con los medios de su tiempo. Así, un ciclista que pedalee sin interrupción día y noche habrá alcanzado el final de la hilera de guisantes en dos meses y medio. Tras ello, se habrá hecho con una buena idea del significado de 7000 millones.

¿Y si probáramos en dos dimensiones? Volquemos los guisantes sobre una moqueta cuadrada. Para contenerlos todos, esta debería medir unos 418 metros de lado. Semejante área ya es abarcable con la vista.

En tres dimensiones resultaría todo más compacto aún: nuestros 7000 millones de guisantes cabrían en un cubo de apenas diez metros de lado, incluso si nos imagináramos cada guisante empaquetado en el interior de una pequeña cajita cúbica. (Otra cuestión, que por una vez me permitiré dejar de lado, sería la de optimizar el empaquetamiento de cada bola, tanto en área como en volumen.)

A mayor número de dimensiones, más manejable resulta el empaquetado de los guisantes. En diez dimensiones, nuestro cubo de 7000 millones de guisantes tendría solo unos pocos centímetros de lado. En dicho cálculo estamos suponiendo que un guisante se expande tanto en cada una de esas dimensiones como en las tres en las que vivimos. Por desgracia, nuestra incapacidad para visualizar más dimensiones del espacio nos impide emplear esos hipervolúmenes para contar guisantes.

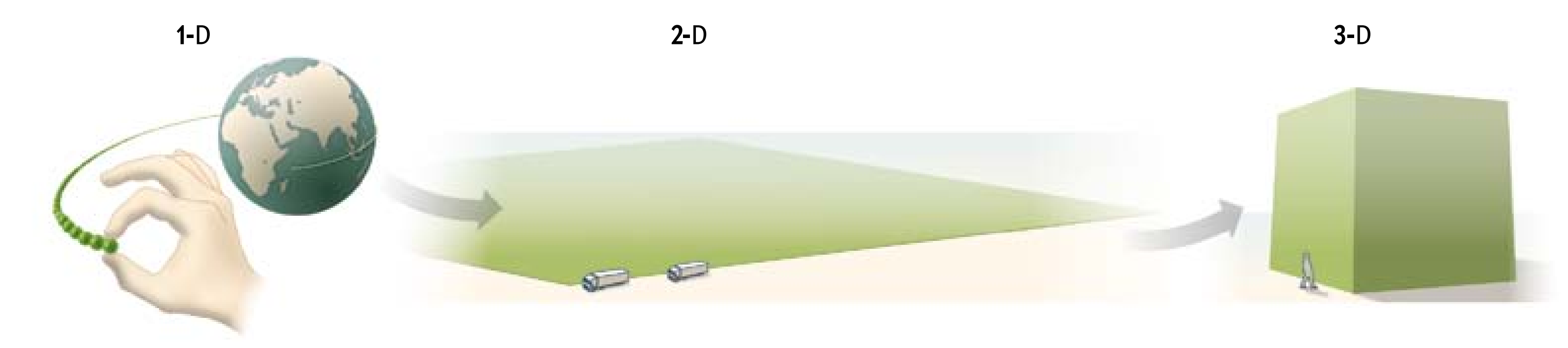
HIPERVOLÚMENES

Un cubo de *n* dimensiones y una arista de longitud *L*, en unidades del diámetro de un guisante, podrá albergar L^n guisantes bien alineados en una malla cúbica (muchos más con un empaquetamiento óptimo). Por tanto, si deseamos empaquetar N guisantes, necesitaremos una arista de longitud $L = \sqrt[n]{N}$. Tomando logaritmos, tenemos que $\log L = (\log N)/n$.

Si $N = 7 \cdot 10^9$ y elegimos los logaritmos en base 10, tenemos que $\log L = 9{,}845/n$. Si $n = 10$, $\log L$ es menor que 1 y, por tanto, L es menor que 10. Así, podemos concluir que, en 10 dimensiones, podríamos empaquetar tantos guisantes como seres humanos hay sobre el planeta en un cubo cuyo lado no llegase a la longitud de 10 guisantes.

Expansión térmica

Uno de los efectos físicos que, debido a sus interesantes aplicaciones, en la escuela se nos enseñan como tremendamente importantes es la expansión térmica. Imaginemos un material que, cada vez que su temperatura se incrementa en 20 grados Celsius, aumentase su largo, alto y ancho en una milésima parte. Aunque se trata de un valor elevado, nos resultará cómodo de cara a los cálculos. ¿Cuánto aumentará el volumen interior de una botella? ¿O tal vez se reducirá, debido al ensanchamiento de las paredes?



PARA ABARCAR CÓMODAMENTE con la vista 7000 millones de guisantes, deberemos empaquetarlos en tres dimensiones.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT/EMDE-GRAFIK

Imaginemos que nuestra botella se compone de pequeños cubos de cristal, y que su interior se encuentra lleno de cubos de aire del mismo tamaño. Si estos aumentan sus dimensiones lineales en un factor de $(1 + x)$, así lo harán también el alto, largo y ancho que conforman las paredes; es decir, el volumen aumentará en un factor de $(1 + x)^3 = 1 + 3x + 3x^2 + x^3$.

Ahora podemos comenzar a aproximar. Supongamos que x es mucho menor que 1. Eso quiere decir que, mientras que la diferencia entre 1 y $1 + x$ puede considerarse relevante, podemos olvidarnos de las diferencias entre 1 y $1 + x^2$ o potencias superiores de x. El valor $x = 0{,}001$ constituye un buen ejemplo: aunque una milésima es aún digna de ser tomada en cuenta, una millonésima o una milmillonésima ya no. Por tanto, el polinomio que hemos escrito arriba nos dice que, si cada dimensión aumenta su longitud en una milésima parte, el volumen lo hace en poco más de tres milésimas partes.

Por otro lado, multiplicar por dos el alto, el ancho y el largo nos obligará a multiplicar por ocho el volumen, lo que equivale a un incremento de 7000 milésimas partes. Por supuesto, ello se debe a que x ya no vale 0,001, sino 1. El binomio sigue siendo válido, pero ya no podemos aplicar la condición de que x sea mucho menor que 1.

Si todo lo que hemos comentado hasta ahora le ha parecido trivial, incluso antes de las explicaciones, pregunte a sus conocidos. Eso sí: procure no decepcionarse.

Manchas de aceite

Reduzcamos ahora nuestros guisantes al tamaño de átomos. Eso significa que ya no podremos establecer su grosor a simple vista, y mucho menos contarlos. Sin embargo, gracias a un elegante truco con dimensiones, seremos capaces de determinar el grosor de cada uno.

Llenemos un cubo de buen tamaño con nuestros guisantes —por supuesto, no podremos saber su número— y esparzámoslos por el suelo, poniendo cuidado en que se toquen entre ellos. Tenemos entonces que la superficie (medible) de nuestra «alfombra» de guisantes, multiplicada por el grosor desconocido de cada uno, deberá ser igual al volumen de nuestro cubo. Así pues, podremos determinar el grosor de los guisantes a partir de ambas magnitudes.

Un experimento con átomos reales procedería de la siguiente forma. Preparamos una mezcla de proporciones precisas a partir de un poco de aceite y mucha gasolina. Con cuidado, vertemos una gota sobre una superficie acuosa. La gasolina ayudará a que el aceite se reparta sobre el agua en una capa de solo una molécula de espesor. Después, se evaporará con rapidez y solo quedará una mancha de aceite. Por último, si precisamente habíamos esparcido en el agua esporas de licopodio (*Lycopodium*), podremos medir la superficie de la mancha de aceite observando cuán lejos empuja esta las esporas. Al igual que en el caso de los guisantes, ello nos permitirá obtener un valor para la longitud de la molécula de aceite y, con ello, para el diámetro de sus átomos.

El experimento de la mancha de aceite reviste una gran importancia histórica. A fin de cuentas, la cuestión de si los átomos eran objetos reales o solo un modelo útil permaneció abierta hasta finales del siglo XIX. Por fortuna, hoy en día los instrumentos como el microscopio de efecto túnel nos permiten echar un vistazo algo más directo a los constituyentes elementales de la materia.

¿Tragedia o chiste?

¿Qué ocurriría si, en vez de moléculas de aceite, utilizáramos seres humanos? En verano de 1998, el director de escena Christoph Schlingensief propuso a los cuatro millones de parados alemanes que se bañaran a la vez en el mismo gran lago de 13 kilómetros cuadrados al que el canciller Helmut Kohl solía ir en vacaciones. Más tarde, un premio nóbel de literatura llegó a temer por su vida en caso de participar. Y, el 25 de agosto de 2010, *The New York Times* recordaba al por entonces recién fallecido Schlingensief mencionando la inundación «teóricamente posible» que habría podido anegar la región de Salzkammergut.

Por suerte, un compañero del director se molestó en hacer la cuenta: calculó que cuatro millones por 0,06 metros cúbicos (el volumen corporal medio de un adulto) y dividido por 13 kilómetros cuadrados daba escasamente dos centímetros. Para hacer subir el nivel del agua los dos metros que se pretendía, se necesitarían 100 veces más bañistas... y unos cuantos millones de tubos de esnórquel, ya que no caben tantas personas unas al lado de otras en la superficie del lago.

Imagine una bañera con forma de cabina telefónica de un metro cuadrado de superficie. Para elevar el nivel del agua dos metros, tendrían que bañarse en ella 25 personas. Por tanto, para elevar el nivel del agua en un lago, necesitaríamos la misma densidad de individuos.

Consideremos ahora el lago Victoria, con sus 69.000 kilómetros cuadrados, y permitamos bañarse allí a toda la humanidad. Ello provocaría una elevación del nivel del agua de 4 milímetros, con una densidad de bañistas de más de 100.000 por kilómetro cuadrado. Ello equivaldría a una red de personas separadas entre sí unos tres metros, por lo que llevar a cabo el experimento no sería demasiado incómodo (salvo el viaje de varios cientos de kilómetros sobre la superficie del agua, que resultaría costoso y debería planearse bien).

Podemos también imaginar a todos los habitantes de la Tierra bañándose en

la playa más cercana. El nivel del mar subiría 1,2 micrómetros. Sin embargo, el cálculo con los guisantes nos hace suponer que las personas no podrían permanecer en la costa unas al lado de otras, sino que tendrían que hacerse sitio unas detrás de otras para entrar en el mar. Y eso que la línea fractal de la costa mide más que la circunferencia terrestre.

Densidades de población reales

De media, viven sobre la superficie del planeta unas 13 personas por kilómetro cuadrado; sobre tierra firme, alrededor de 50. A la vista de las amplias regiones despobladas que existen en la Tierra, se trata de un número enorme. Los humanos nos distribuimos de manera muy desigual en las diferentes regiones y países. Y, cuanto más de cerca examinamos la situación, más desviaciones encontramos con respecto a la media.

Entre los países de Europa, Holanda cuenta con el récord de 402 habitantes por kilómetro cuadrado, si bien se ve superada por la región alemana de Renania del Norte-Westfalia, con 523. La lista mundial la encabeza Bangladés, con cerca de 1000 habitantes por kilómetro cuadrado. Sin embargo, queda a la sombra de dos países diminutos, como Mónaco y el Vaticano y, sobre todo, de los barrios sin zonas verdes de las grandes metrópolis. En el 11º distrito de París, entre las estaciones de metro de Bastille, Nation y République, habitan 40.000 personas por kilómetro cuadrado. Si todas ellas vivieran a ras de suelo, la distancia media entre dos individuos sería de unos 5 metros. Así las cosas, no podemos sino agradecer la edificación vertical; es decir, una expansión limitada en la tercera dimensión.

Llegados a este punto, podríamos añadir algún comentario sobre los intentos de batir el récord del mayor número de personas en una cabina telefónica o sobre el tamaño de las cabinas o las literas en los grandes barcos. Los peores casos de hacinamiento humano tuvieron lugar durante el transporte de esclavos en el Atlántico. A mayor número de personas, queda claro que lo que importa no es el volumen, sino el área; sobre todo, debido al suministro de aire, agua y luz.

La constante solar

Como bien sabemos, el Sol constituye una descomunal fuente de energía. También en este caso podremos hacernos una idea del significado de ciertos números si los imaginamos divididos por el número de habitantes de la Tierra.

La densidad de energía por unidad de tiempo que llega del Sol a la órbita terrestre (la llamada constante solar) asciende a unos 1,38 kilovatios (kW) por metro cuadrado. Nuestro planeta azul devuelve al espacio en torno a un cuarto de la energía que recibe, sin apenas transformarla, antes de que esta llegue al suelo. El resto es absorbido y después reemitido en forma de radiación térmica de baja energía, a lo que se suma algo de energía procedente del interior de nuestro planeta.

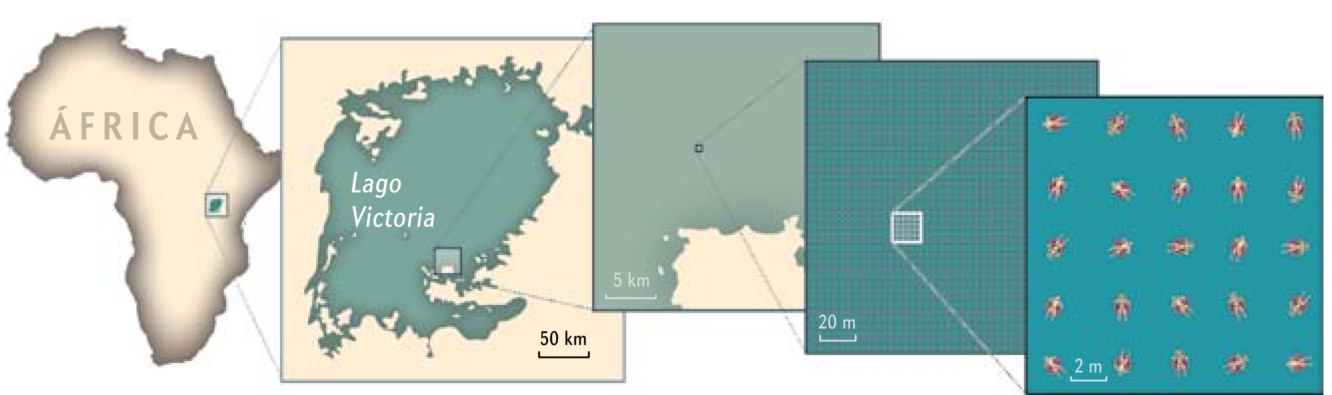
Así pues, nos queda disponible cerca de 1 kW por metro cuadrado de sección transversal. Dado que, en una esfera, la superficie total cuadruplica dicha sección, tenemos que a cada metro cuadrado de la superficie de nuestro planeta llegan 0,25 kW (promediado al día, la estación del año y la zona climática).

El metabolismo basal de una persona ronda un vatio por kilogramo de masa corporal; es decir, menos de 0,1 kW para un adulto. En esencia, esa energía se obtiene transformando el alimento y el oxígeno en CO_2 y vapor de agua y, a su vez, procede de la que unas semanas antes adquirieron las plantas verdes mediante la fotosíntesis gracias a la luz solar. Por supuesto, si hacemos ejercicio físico el consumo energético se multiplicará. Con todo, los valores que en su día necesitaron los constructores de las pirámides o las grandes catedrales hoy prácticamente solo se alcanzan en algunas competiciones profesionales, como el Tour de Francia.

La ración energética que hemos mencionado basta para satisfacer nuestras necesidades físicas elementales. En las sociedades industrializadas, sin embargo, consumimos entre 50 y 100 veces más debido a nuestro uso de medios de transporte, calefacción y producción de bienes (5 kW en Europa y 10 en EE.UU.). Y también lo pagamos: ya sea directamente a la gasolinera, la compañía del gas o la de electricidad, o de manera indirecta cuando compramos cualquier bien cuya elaboración requiera energía; es decir, prácticamente todos.

En términos energéticos, ese consumo equivaldría a vivir en el Imperio romano tardío y disponer de unos 50 esclavos para nuestra comodidad personal. La clase alta de aquella época nunca gozó, siquiera remotamente, de semejante privilegio —y no solo porque no hubiera suficientes esclavos para igualar nuestro derroche energético.

La quema actual de combustibles fósiles procede 500.000 veces más rápido que el ritmo al que estos se formaron hace millones de años. Cuando, en un futuro previsible, dichos combustibles se agoten,



TODOS LOS HABITANTES DE LA TIERRA podrían chapotear a la vez en el lago Victoria a una confortable distancia de tres metros entre uno y otro.

¿podremos extraer del Sol una potencia 50 veces superior a la de nuestro metabolismo basal?

Por cada kilómetro cuadrado de la superficie terrestre, en el que de media viven las 13 personas antes mencionadas, recibimos unos 250 MW de luz solar. Ello resulta en unos 20 MW por persona: una cifra entre 3 y 5 órdenes de magnitud mayor que el «metabolismo tecnológico» de 5 kW. En otras palabras, energía no falta. Bastaría con dedicar una pequeña parte del suelo a la agricultura y colectores solares, y podríamos darnos por satisfechos con eficiencias pobres a la hora de producir y consumir energía. La mayor parte quedaría para el resto de la biosfera. Sin embargo, nuestro fracaso a la hora de satisfacer nuestro lujo energético con energía solar (incluidas la hidroeléctrica y la eólica) no se debe a que el Sol suministre una energía escasa.

Potencia por unidad de masa

Un antiguo colega de universidad estaba muy orgulloso de la relación entre potencia y masa de su pequeño automóvil supermotorizado, ya que facilitaba la aceleración. Para un coche a todo gas, dicha relación supera en hasta tres órdenes de magnitud la de una persona en reposo. Por suerte, tales consumos no tienen lugar durante las 24 horas del día. Para grandes barcos, la misma proporción es apenas mayor que en las personas. En un avión, en cambio, el consumo por unidad de masa se asemeja al de un automóvil.

Si deseamos desplazarnos con el mínimo esfuerzo posible, el trabajo muscular que ejercen los gemelos es óptimo: una actividad cómoda en una bicicleta, aunque mucho menos en el *Gossamer Albatross*, el avión a pedales que en 1979 cruzó el Canal de la Mancha. En este último, el piloto debe igualar la potencia por unidad de masa de un ciclista bien entrenado, la cual asciende a algo más de un vatio por kilogramo. Si se comparan diferentes especies animales, dicha proporción aumenta a medida que consideramos animales más y más pequeños. En mamíferos y aves resulta válida la regla de Kleiber, con exponente 3/4 [*véase* «De visita en el país de Liliput»; *en esta misma sección*, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2011]. Los animales de menor tamaño alcanzan metabolismos basales de hasta 10 vatios por kilogramo.

¿De qué relación hace gala una estrella como el Sol? Recordemos que, a una distancia de 150 millones de kilómetros, el astro proporciona 1,38 kilovatios por metro cuadrado. Dado que esa energía es radiada en todas direcciones, podemos deducir fácilmente que la potencia de emisión del astro asciende a $4 \cdot 10^{26}$ vatios. Dividido por su masa, $1{,}97 \cdot 10^{30}$ kilogramos, obtenemos 2 milivatios por kilogramo.

Si un hada bienintencionada regalase a cada ser humano un trozo de Sol, para cubrir nuestro consumo energético de 100 vatios debería proporcionarnos un pedazo de estrella con una masa equivalente a la de 80.000 personas, mezclando partes interiores y exteriores del astro y llevando a cabo con éxito los procesos de fusión nuclear, comoquiera que funcionasen.

En comparación con los seres humanos o nuestros aparatos, el Sol emite una potencia diminuta con relación a su masa. Con todo, no deberíamos olvidar que ese material solar, con una masa equivalente a la de 80.000 personas, contiene el combustible necesario para varios miles de millones de años. Al contrario que un pájaro o un avión, el Sol no tiene que repostar. En este sentido, debemos agradecer a la interacción nuclear débil la lentitud con la que lleva a cabo los procesos de fusión nuclear.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



La brecha de Sloane

Tras la huella sociológica de las matemáticas

El matemático Neil Sloane empezó a coleccionar sucesiones de números enteros en 1964. Tras la publicación de dos libros recopilatorios, multitud de colegas comenzaron a enviarle sucesiones que consideraban interesantes. Al poco, el proyecto se hizo inviable en papel. Así nació la Enciclopedia Electrónica de Sucesiones Enteras, también conocida como OEIS por sus siglas en inglés (*On-Line Encyclopedia of Integer Sequences*: https://oeis.org). En el momento de escribir este artículo, la OEIS almacena más de 240.000 sucesiones y continúa creciendo sin parar.

¿Puede el lector encontrar una expresión sencilla para el término general de la sucesión 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12...? Contémplela y piense un momento antes de continuar leyendo.

Si la ha identificado como la sucesión complementaria a la de los cuadrados perfectos (es decir, aquella formada por todos los números que no son cuadrados perfectos), habrá podido expresar su término general como: $a(n) = n + [1/2 + \sqrt{n}]$, donde los corchetes denotan la parte entera. Así, el término quinto viene dado por $a(5) = 5 + [1/2 + \sqrt{5}] = 5 + [2{,}736...] = 5 + 2 = 7$.

Seguro que el lector conoce la siguiente y famosa sucesión: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21... Pero supongamos que no es el caso y que, tras unos cuantos cabezazos, la impotencia se apodera de su espíritu. Podrá entonces acudir a la página web de la OEIS, escribir los términos en cuestión y obtener la respuesta: la sucesión de Fibonacci. Esta puede generarse a través de la recurrencia $F(n) = F(n-1) + F(n-2)$, con condiciones iniciales $F(0) = 1$ y $F(1) = 1$.

La OEIS nos ofrece una lista con los 39 primeros términos, la posibilidad de representarlos gráficamente o incluso escucharlos convertidos en música. También nos muestra una gran cantidad de comentarios sobre la aparición de los números de Fibonacci en todo tipo de problemas matemáticos, una nutrida colección de referencias bibliográficas y enlaces, así como fórmulas menos conocidas para generarlos, métodos para hacerlo en algunos programas de cálculo simbólico, como Mathematica o Maple, o en pseudocódigo, para que lo programemos nosotros mismos. De hecho, la OEIS hila aún más fino: nos propone como primera solución los números de Fibonacci, pero nos ofrece hasta 73 sucesiones distintas cuyos ocho primeros términos coinciden con los que hemos tecleado.

Pero la OEIS no solo nos permite introducir los números de una sucesión, sino también palabras clave. Si escribimos *spanish*, nos devolverá 95 resultados. Uno de ellos será la sucesión 4, 3, 3, 4, 6, 5, 4, 5, 4, 5, 4..., otro clásico de las matemáticas recreativas. Por algún motivo, esta sucesión se encuentra emparentada con nuestro querido idioma. ¿Adivina el lector el siguiente término?

Si vamos introduciendo palabras, comprobaremos que la OEIS constituye una fuente de conocimientos sobre temas científicos de toda índole. Al teclear *planet*, encontraremos las secuencias de los períodos de rotación o los diámetros de los planetas del sistema solar. Y si escribimos *carbon* (referido al átomo de carbono), obtendremos una gran cantidad de información sobre química orgánica.

Probemos ahora con un término menos científico y tecleemos *lazy* («perezoso»). Aparecerá ante nuestros ojos la sucesión llamada «del hostelero perezoso». Sus primeros términos son 2, 4, 7, 11, 16, 22, 29, 37, 46, 56... Adelantaremos que esta enumera el máximo número de trozos, no necesariamente iguales, que podemos obtener de una pizza circular con n cortes rectos de cuchillo. Ahora ya nos hacemos una idea del porqué de su estrambótico título. ¿Sabría el lector encontrar el término general?

Visto lo visto, la OEIS no es solo una página de referencia para investigadores, sino también una magnífica herramienta para educadores y una fuente inacabable de matemáticas recreativas.

Diccionarios de números

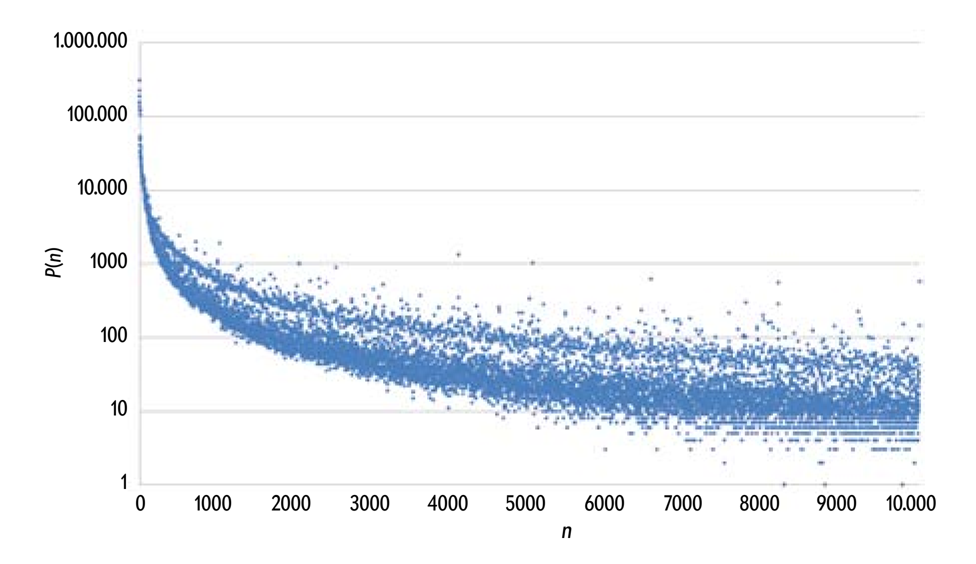
Existen multitud de diccionarios de números: *Les nombres remarquables*, de François Le Lionnais (1983); *Mathematical constants*, de Steven Finch (2003), *Those fascinating numbers*, de Jean-Marie De Konninck (2009)... La propia Wikipedia incluye un diccionario. Si escribimos «42», descubriremos, entre otras cosas, que este número da la respuesta a «el sentido de la vida, el universo y todo lo demás».

Tal vez el diccionario de números más popular sea *The Penguin dictionary of curious and interesting numbers*, de David Wells. Publicado por primera vez en 1987, constituye un libro de referencia para los amantes de las matemáticas recreativas.

Al llegar a la entrada correspondiente al número 39, el autor nos regala la siguiente perla: «Este parece ser el primer número carente de interés, lo que por supuesto lo convierte en un número especialmente interesante, ya que se trata del número más pequeño que tiene la propiedad de ser anodino. Es por tanto, también, el primer número simultáneamente interesante y anodino». En la obra de Wells, el primer ausente es el número 43. En la versión hispana de la Wikipedia, el primer número sin mención (hay que escribirlo en palabras) es «doscientos uno».

La OEIS funciona también como un diccionario de números. Introduzcamos un clásico: 1729. La OEIS nos informa de que el número aparece en 499 sucesiones. En la sexta posibilidad (*Taxi-cab numbers*), nos cuenta que el número se conoce hoy como número de Hardy-Ramanujan. La historia que justifica su nombre es hoy célebre. En cierta ocasión, el experto en teoría de números Godfrey Harold Hardy visitó a su colega Srinivasa Ramanujan en el hospital. Al llegar, le comentó que el taxi que lo había traído tenía un número de placa anodino, el

ABISMO NUMÉRICO: **Frecuencia $P(n)$ con la que aparecía cada número n comprendido entre el 2 y el 10.000 en la base de datos de OEIS en agosto de 2008. Los datos, empleados por Philippe Guglielmetti, pueden descargarse como hoja de Excel desde www.box.net/shared/3yefxar19b.**



1729, a lo que Ramanujan respondió: «No, se trata de un número muy interesante. Es el primer número natural que puede expresarse como la suma de dos cubos positivos de dos formas diferentes». Y, en efecto, $1729 = 12^3 + 1^3 = 10^3 + 9^3$. A modo de homenaje, hoy se conoce como «enésimo número *taxicab*» al número más pequeño que puede descomponerse como n sumas distintas de dos cubos positivos.

A continuación, Hardy preguntó a Ramanujan si conocía la respuesta para las cuartas potencias. Tras pensarlo un momento, Ramanujan contestó que no veía la solución, pero que debía tratarse de un número extremadamente grande. Hoy, gracias a los ordenadores, sabemos que la respuesta es 635.318.657 (el cual es igual a $134^4 + 133^4 = 158^4 + 59^4$).

También se conoce como «número *taxicab* generalizado», Taxicab(k, j, n), al más pequeño que puede expresarse como la suma de j k-ésimas potencias de n formas diferentes. El caso $k = 3$ y $j = 2$ corresponde a los números *taxicab*. Y, con $n = 2$, obtenemos el número de Hardy-Ramanujan.

Números populares

La base de datos de la OEIS puede descargarse en https://oeis.org/stripped.gz. En el fichero, cada sucesión aparece identificada mediante una etiqueta (por ejemplo, A001235 denota la sucesión de los números *taxicab*) y, a continuación, se muestran sus primeros términos.

En agosto de 2008, el matemático Philippe Guglielmetti decidió estudiar la frecuencia con la que aparecían los distintos números en la OEIS. Encontró que el primer número ausente de la base de datos, el primer número anodino, era el 8795. Para cada entero n comprendido entre el 2 y el 65.536, Guglielmetti calculó el número de veces $P(n)$ que aparecía en la base de datos. Halló que $P(2) = 308.154$, $P(3) = 221.140$, $P(4) = 159.911$, etcétera. O, como hemos apuntado, que $P(8795) = 0$.

Al representar n frente a $P(n)$, observó que la nube de puntos quedaba dividida en dos bandas separadas por una zona mucho más clara (*véase la figura*). La franja superior correspondía a aquellos números que aparecían con una frecuencia elevada, y la inferior, a números anodinos, como $P(8267) = P(9734) = 1$, $P(7495) = P(8758) = 2$, etcétera.

Intrigado por el fenómeno, Guglielmetti comentó la cuestión con el matemático Jean-Paul Delahaye. ¿A qué podía deberse esa franja blanca que separaba los números en dos clases? Delahaye, en colaboración con Hector Zenil y Nicolas Gauvrit, matemático y psicólogo, respectivamente, constataron que, tras ajustar por regresión la nube de puntos ($P(n) = an^{-4/3}$, con $a = 2{,}53 \cdot 10^8$), los números primos, las potencias de enteros y los números compuestos por una gran cantidad de primos diferentes prácticamente capitalizaban la banda de los números interesantes.

El motivo, razonaron, probablemente se debiera a que numerosas sucesiones se definen por una combinación de tales criterios. Si, por ejemplo, buscamos 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17..., no solo obtendremos como respuesta «los números primos», sino un total de 292 resultados, producto de combinar la primalidad con otras propiedades. En cierto modo, concluyeron los investigadores, $P(n)$ mide la riqueza de propiedades del número n.

Atendiendo a esa intuición, y con ayuda de las herramientas de la teoría de la complejidad algorítmica, estimaron la forma decreciente de $P(n)$ y, mediante una astuta simulación de Montecarlo, reprodujeron de manera cualitativa la nube de propiedades numéricas. La semejanza era innegable, pero había una diferencia trascendental: la brecha de Sloane —como acabaron bautizando a la separación entre los números interesantes y los anodinos— no aparecía. Razonaron que la respuesta no se encontraba en la matemática, sino en la sociología.

Según Delahaye, Zenil y Gauvrit, la brecha de Sloane no constituiría un efecto matemático, sino «social». Se debería a que los matemáticos, arrastrados por investigaciones anteriores o por modas, se interesan más por ciertas propiedades que por otras de igual complejidad.

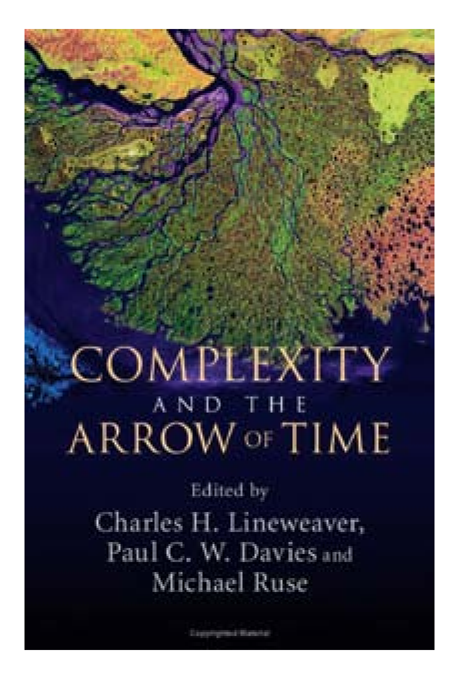
La brecha de Sloane sería así la impronta de la contingencia en la investigación matemática: la huella de su evolución histórica y humana. ¿Daríamos tanta importancia a los números *taxicab* generalizados si Hardy no se hubiera subido aquella mañana al taxi 1729?

PARA SABER MÁS

Mille collections de nombres. Jean-Paul Delahaye en *Pour la Science*, n.º 379, págs. 88-93, mayo de 2009.

Le fossé de Sloane. Entrada en el blog de Philippe Guglielmetti, 2011: **www.drgoulu.com/2011/04/10/le-fosse-de-sloane**

Sloane's gap: Do mathematical and social factors explain the distribution of numbers in the OEIS? Nicolas J.-P. Gauvrit, Jean-Paul Delahaye y Hector Zenil en *Journal of Humanistic Mathematics*, vol. 3, n.º 1, págs. 3-16, 2013.



COMPLEXITY AND THE ARROW OF TIME.

Dirigido por Charles H. Lineweaver, Paul C. W. Davis y Michael Ruse. Cambridge University Press; Cambridge, 2013.

Conceptos interdisciplinares

En busca de la unidad de las ciencias de la naturaleza

Existe una idea muy extendida de que el universo en general, y la vida en particular, se van haciendo cada vez más complejos con el tiempo. Para admitir que el mundo físico es extraordinariamente complejo basta con mirar a nuestro alrededor. De las moléculas a los cúmulos galácticos, se observa una superposición de capas de estructuras y de procesos complejos. El éxito de la empresa científica a lo largo de los últimos 300 años parte en buena medida del supuesto de que, en el universo, más allá de la complejidad que reina en la superficie, existe una elegante simplicidad matemática. Desde hace unos años, favorecido por la disponibilidad de una computación rápida y poderosa, la ciencia ha buscado principios generales que gobiernen la complejidad. Se han abordado diferentes formas de complejidad, desde el apilamiento caótico de rocas hasta la organización exquisita de un ser vivo.

El progreso espectacular registrado en física de partículas o atómica se debe a que se deja de lado la complejidad de los materiales para centrarse en sus últimos componentes, bastante más sencillos. Los adelantos en cosmología dejan en buena medida de lado las complicaciones de la estructura galáctica y abordan el universo desde un enfoque simplificado. Las técnicas aplicadas a la física de partículas y a la cosmología no sirven para descubrir la naturaleza y el origen de la complejidad biológica, que parece emerger sin cesar. La evolución darwinista explica cómo apareció la complejidad biológica, pero no aporta ningún principio general de por qué surgió. La supervivencia del mejor adaptado no es necesariamente la supervivencia del más complejo. Los físicos se esfuerzan por alcanzar una definición unificada de complejidad, mientras que los biólogos y científicos de la complejidad describen su naturaleza.

Pero ¿qué es la complejidad? ¿Por qué aumenta? A este concepto interdisciplinar se han asociado otros: entropía, orden, información, computación, emergencia o energía libre. Pero no es fácil extender nociones que tienen un significado propio en una disciplina a otra. La energía libre posee un sentido propio en física y química, de difícil encaje en biología; dígase lo propio de la entropía, la información y la computación. Sobre los conceptos orden y emergencia reina una enorme confusión por su vaguedad. Incluso conceptos que creemos unívocos y asentados carecen de límites precisos. Tal el concepto de gen.

Decenios de análisis han desembocado en la creencia común de que el gen constituye una entidad perfectamente definida, que se expresa en una función nítida. En medios científicos, médicos sobre todo, se supone que se trata de una secuencia específica de información genética que, cuando se convierte en ARN mensajero, codifica una proteína. Solo habría que vincular enfermedades con sus genes subyacentes. Entre los genetistas, sin embargo, la noción de gen se ha tornado harto borrosa. Allí donde antaño se veían genes acotados e individualizados, que producían transcriptos de ARN, perciben ahora una masa caótica de ARN. Se pone en cuestión la vieja esperanza de la reducción de problemas biológicos complejos a una interpretación mecanicista del ADN. Ni siquiera se ponen de acuerdo los expertos en centrar en los genes la atención principal con sacrificio de otras partes del genoma, las proteínas o la interacción mutua en distintos tejidos.

Los cosmólogos sostienen que un segundo después de la gran explosión (*big bang*), hace 13.800 millones de años, el universo era una sopa uniforme de protones, neutrones, electrones y neutrinos, partículas subatómicas bañadas en una radiación uniforme. De la misma surgieron, andando el tiempo, múltiples niveles de complejidad que jalonaron la evolución del universo. A medida que el universo se enfriaba y expandía, la materia no solo se agregaba en estructuras, sino que empezó un proceso de diferenciación progresiva que continúa hasta hoy. El primer estadio fue la formación de helio (He) durante los tres primeros minutos, de modo que la composición química del material cosmológico constaba de hidrógeno (H) y He. Con la formación de las galaxias, unos 400 millones de años más tarde, nacieron las primeras estrellas y se añadieron elementos más pesados que el H y el He; y se diseminaron en las regiones interestelares por explosiones de supernova. Se liberó así el potencial para una variedad casi ilimitada de formas materiales sólidas, que iban de granos finísimos a los planetas.

Con la aparición de los planetas con superficies sólidas, el camino quedaba expedito para el enriquecimiento ulterior de formas materiales a través de cristalización y formación de sustancias amorfas. Las posibilidades fueron astronómicas. La historia de la materia es la historia de una complejidad creciente. Quedémonos en el humilde copo de nieve para comprobar que incluso una población de cristales de hielo puede combinarse en múltiples patrones de filigranas hexagonales, pues quizá no haya habido dos copos de nieve iguales en la historia de la Tierra. Una historia similar cabe aplicar a casi todas las estructuras sólidas; no hay dos rocas de idéntica composición interna o forma externa. La distribución de los objetos no conoce límites. Sin embargo, el futuro del universo será de simplicidad incesante como resultado de la expansión acelerada.

Otro tanto puede aplicarse a los fluidos: no hay dos nubes iguales, ni dos océanos con idéntico patrón de flujo, ni hay dos pautas de convección planetarias iguales (ni, por tanto, dos pautas de campos magnéticos), ni dos patrones de viento estelar, ni dos lluvias de rayos cósmicos, ni... El principio de esa explosión de diversidad puede buscarse en la ruptura de la simetría.

Una de las predicciones principales de todos los tiempos fue realizada en 1852 por el físico William Thomson (lord Kelvin). A partir de las leyes de la termodinámica y la naturaleza de la entropía, Thomson llegó a la conclusión de que el universo se estaba muriendo. La segunda ley de la termodinámica, que había sido formulada años antes por Clausius, Maxwell, Boltzmann y otros, establece que, en un sistema físico aislado, la entropía total (la medida del desorden) no puede disminuir nunca. Todos los procesos físicos, mientras pueden producir una caída de entropía en una región local, entrañan siempre una subida de entropía en cualquier otro lugar que compense lo anterior, de suerte que el resultado neto sea un aumento de la entropía total. Aplicado al universo en su totalidad, la segunda ley predice un crecimiento inexorable de la entropía global con el tiempo y un crecimiento concomitante del desorden. El aumento de entropía debe ahora definirse en referencia a un volumen en expansión del espacio. Una visión simple de la segunda ley de la termodinámica es que el universo comenzó en un estado bajo de entropía, entropía que ha ido en aumento desde entonces y seguirá creciendo en el futuro.

La creciente complejidad del universo se realiza a costa de un aumento de la entropía del campo gravitatorio: mientras la materia y la radiación disfrutan de una energía libre sostenida en virtud del campo para promover procesos complicados, el propio campo gravitatorio paga el precio en su ser desordenado. De modo que la entropía total del universo aumenta incluso cuando crece la riqueza, complejidad y diversidad de sus contenidos. Un campo gravitatorio de baja entropía presenta una forma simple, mientras que un campo de entropía elevada es complejo.

La complejidad no puede aumentar en el tiempo sin una fuente de energía libre para generarla o transferirla. Ello solo es posible si el universo no se encuentra en un estado de equilibrio termodinámico (de muerte térmica). Ejemplo bien conocido de la emergencia de la complejidad y del concomitante incremento de la entropía (o caída de energía libre) que hay que pagar por ello es la estructura organizada de un huracán, que solo es posible por la existencia (y baja entropía) de gradientes de presión, temperatura y humedad. También ofrece otro ejemplo el origen de la vida instado por la explotación de alguna forma de potencial químico redox. La entropía constituye el grado de desorden de un sistema; ello implica que es el orden, y no la complejidad, lo que desempeña un papel inverso. No hay, pues, incompatibilidad entre avanzar en complejidad y avanzar en entropía.

Puesto que la complejidad física requiere la explotación de gradientes de energía libre, el desarrollo de cualquier tipo de complejidad está vinculado a la disminución de energía libre y al incremento de entropía, en conformidad con la segunda ley de la termodinámica. Ahora bien, que el desarrollo de la complejidad sea coherente con la segunda ley no significa que sea explicado por ella. Numerosos autores han reconocido que la entropía y la segunda ley guardan un nexo fundamental con la complejidad. Pero no se trata de una simple relación inversa.

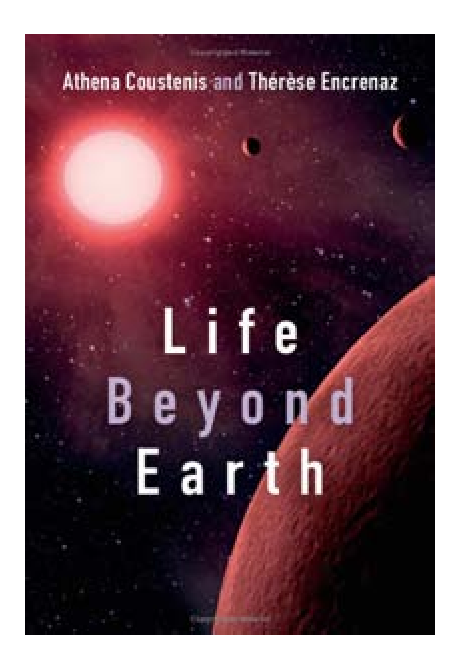
Con la formación de planetas, se abre la puerta a la formación de la vida y el desarrollo de la complejidad biológica. Parece incuestionable que la biosfera es hoy mucho más compleja que cuando la vida apareció sobre la Tierra. (Nadie sabe cuándo ocurrió, pero existe un acuerdo general en fijar esa época hace algo más de 3500 millones de años.) No podemos separar la complejidad de los organismos de la complejidad de su entorno. Un individuo humano es más complejo que una bacteria y una pluviselva más compleja que una colonia de bacterias. Darwin adoptó la metáfora del árbol para describir la evolución, con sus ramas y puntos de separación. Un árbol evolutivo es manifiestamente asimétrico con el tiempo: resulta completamente distinto si lo miramos de arriba abajo. Las mutaciones pueden causar que una especie se divida en dos por divergencia genómica, pero no encontraremos nunca dos especies que se fundan en una (salvo en el exclusivo caso de la endosimbiosis), por la sencilla razón de que es infinitésima la probabilidad de que diferentes secuencias genómicas que representan dos especies acometan las mutaciones requeridas para convertirse en una idéntica.

No existe una ley absoluta sobre la complejidad biológica, aunque se han documentado dos tendencias en la escala de la historia de la vida: el tamaño corporal y la jerarquía (célula procariota, célula eucariota, individuo multicelular, colonia). Si el Sol explotara mañana y destruyera toda la vida, habría que partir de cero para la emergencia de esta. Y por lo que se refiere a la biosfera en su globalidad, la evolución de la complejidad no es vía de dirección única.

La complejidad biológica puede hallarse en una especialización incrementada de partes corporales tales como la duplicación y subsiguiente diferenciación de extremidades animales, en las relaciones entre especies y en las redes de ecosistemas. Aunque el grado de especialización parece un criterio razonable de complejidad biológica, existen numerosos ejemplos en la historia de la vida sobre la Tierra en los que la especialización ha conducido a la extinción, mientras que la simplificación ha conducido a un éxito adaptativo y a la supervivencia. Con otras palabras, la macroevolución exhibe tendencias en una doble dirección: hacia la complejidad y hacia la simplicidad.

Cabe la posibilidad de que la vida haya encontrado y refinado las principales soluciones operativas de los problemas de supervivencia y reproducción, de que la diversidad de la vida tenga saturado el espacio de complejidad y que la complejidad se esté acercando a sus límites. Salvo la complejidad neural, que podría no haber alcanzado su apoteosis en los humanos. Aunque el cerebro de los vertebrados conoció varios incrementos de tamaño, la encefalización rampante se inició en los últimos 20 millones de años. Los datos actuales dan 18 millones de años para el cerebro del delfín, 7 millones de años para los homínidos y quizá la misma cifra para los cuervos de Nueva Caledonia. El cerebro humano constituye la entidad más compleja del universo. Cuando la información suministrada por el entorno cambia con una celeridad que impide ser incorporada en los genes (es decir, cambios en el medio a una escala temporal inferior a una generación), puede incorporarse en las capacidades de información biológica del cerebro. Igual que la complejidad biológica, la complejidad cultural dependería, en última instancia, de la complejidad física.

—Luis Alonso



LIFE BEYOND EARTH. THE SEARCH FOR HABITABLE WORLDS IN THE UNIVERSE

Por Athe Coustenis y Thérèse Encrenaz. Cambridge University Press; Cambridge, 2013.

Astrobiología

Vida extraterrestre

Entre las cuestiones científicas más apasionantes de todos los tiempos sobresale la de llegar un día a conocer si la vida que palpita en la Tierra es un regalo excepcional del planeta o constituye un fenómeno común en el cosmos. La vida en el espacio, se trate de organismos extraños en mundos lejanos o de una expansión de nuestra propia especie en el sistema solar, despierta por igual la inquietud intelectual y la imaginación. La humanidad podría hallarse en puertas de grandes descubrimientos. Hay en marcha misiones de notable refinamiento técnico, como *Cassini*, que ha venido explorando el sistema saturniano y Titán desde 2004. Otras se hallan en preparación, como la *Sample Return* a Marte o la *Icy Moons Explorer* a Júpiter. Sin olvidar otros programas no menos ambiciosos, como el de instalar telescopios gigantes que inspeccionen planetas.

La Vía Láctea, que se originó hace unos 12.000 millones de años, sigue activa en continuo alumbramiento de estrellas. La Tierra debe su composición química a miles de generaciones de estrellas que vivieron y expiraron mucho antes del nacimiento del sistema solar, ocurrido hace unos 4600 millones de años. En nuestro planeta, dotado de un núcleo magnético de hierro, un océano de agua y una atmósfera de nitrógeno, carbono y oxígeno, apareció y medró la vida. Pero ¿solo aquí?

El campo emergente de la astrobiología dio su primer paso firme en 1961, en Green Bank, West Virginia, donde radioastrónomos y biólogos reunidos en un congreso abordaron las perspectivas de vida inteligente fuera de la Tierra. En la preparación del encuentro, Frank Drake, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, desarrolló una ecuación sobre las probabilidades de planetas con capacidad para la telecomunicación en la Vía Láctea. Sostienen los astrobiólogos que la presencia de vida en el universo requiere una fuente de energía, un tipo de átomo que permita la existencia de estructuras complejas, un solvente donde las moléculas puedan flotar e interaccionar y tiempo suficiente para que la vida emerja y evolucione. En la Tierra, el tipo de átomo exigido se cumple con el carbono. Los átomos de carbono pueden enlazarse hasta con otros cuatro átomos, lo que lo convierte en el elemento crucial de la vida tal como la conocemos. Con el hidrógeno, el nitrógeno y el oxígeno, el carbono pertenece al grupo más abundante de elementos que encontramos en todas las formas de vida. En el universo, a esos cuatro hay que sumar dos gases inertes: el helio y el neón.

Lo mismo que el carbono, los átomos de silicio pueden enlazarse con otros cuatro átomos, pero la naturaleza de tales enlaces no aporta base estructural para moléculas complejas. Los enlaces establecidos por el carbono con otros átomos (carbono-oxígeno, carbono-hidrógeno o carbono-carbono, por ejemplo) se rompen con relativa facilidad; merced a ello, las moléculas basadas en el carbono pueden formar nuevos tipos tras colisionar e interaccionar, componente esencial de cualquier actividad metabólica. Por el contrario, los enlaces de silicio se traban vigorosamente con otros átomos (de manera singular con los de oxígeno, cuya unión persiste millones de años), lo que les incapacita para formar nuevos tipos moleculares.

Hay más. Para identificar la presencia de material biogénico en una fuente extraterrestre podemos servirnos de una medida basada en los isótopos de carbono. En la Tierra, la relación $^{12}C/^{13}C$ en los minerales es de 90. Sin embargo, en los organismos esa razón se altera debido a la fotosíntesis. Las plantas utilizan preferentemente el isótopo más ligero (^{13}C) cuando convierten la luz solar y el dióxido de carbono en materia orgánica. Existen dos ciclos de fotosíntesis en la Tierra: el de fotodisociación C3, que se emplea en entornos templados, es el más común y conduce a un cambio en la razón $^{12}C/^{13}C$ de un 2,6 por ciento; el de fotodisociación C4, privilegiado en medios cálidos y secos, produce un cambio mucho menor. En consecuencia, la razón de $^{12}C/^{13}C$ es de 92,4.

La ciencia acepta ya la hipótesis de que los planetas que giraron en órbita alrededor de las primeras estrellas pudieron albergar vida. Se ha calculado incluso que el agua líquida —prerrequisito para la vida— pudo haberse formado en planetas rocosos a los 15 millones de años de la gran explosión inicial. Según Abraham Loeb, astrofísico de la Universidad Harvard, en el universo primitivo, la energía requerida para mantener líquida el agua podría haber procedido del fondo cósmico de radiación de microondas. Hoy, la temperatura de esa radiación fósil es de 2,7 kelvin, pero cuando el universo tenía 15 millones de años sería de 300 kelvin. Podría haber habido entonces planetas rocosos en zonas del universo donde la materia fuera excepcionalmente densa. Allí pudo haberse dado una época habitable durante dos o tres millones de años.

Las respuestas al trabajo de Loeb varían. Christopher Jarzynski, de la Universidad de Maryland, no está convencido de que la vida pudiera existir en un universo uniformemente caliente. La vida sobre la Tierra depende termodinámicamente no solo de la fuente de calor del Sol, sino también del fondo cósmico de radiación de microondas frío, que aporta un sumidero de calor. Alexander Vilenkin, de la Universidad Tufts, sostiene que tan pocos

millones de años es muy escaso tiempo para producir vida inteligente. Freeman Dyson, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, piensa que la vida podría ser más adaptable de lo que pensamos. En su opinión, todo es habitable si sabemos desenvolvernos.

La condición universal común a todas las teorías sobre el origen de la vida es el agua líquida. Todas las formas de vida necesitan un solvente donde las moléculas puedan flotar e interaccionar. Las notables propiedades químicas del agua como solvente y su abanico de rasgos insólitos resultan del hecho de que sus moléculas forman enlaces débiles, enlaces de hidrógeno. El agua consta de dos de las moléculas más abundantes del cosmos; aparece en modesta cuantía en cometas, meteroides y la mayoría de los planetas solares con sus lunas. Se ha identificado agua en los lugares más dispares: en forma de vapor en las nebulosas de emisión, de hielo en los discos protoplanetarios y líquida por debajo de la corteza helada de varias lunas de Júpiter (Europa, Ganímedes y Calixto). En 2005, la nave espacial *Cassini* tomó imágenes de géiseres de agua líquida en erupción en la superficie de Encélado, luna de Saturno. A partir del único caso conocido, el de la Tierra, habrá que concluir que la vida requiere un entorno húmedo, rico en carbono, privado para el oxígeno y el nitrógeno, con trazas de otros elementos relativamente pesados (fósforo, azufre, sodio, magnesio, cloro, potasio, calcio y hierro), junto con fuentes disponibles de energía libre.

A longitudes de radioonda se han descubierto alcoholes (metanol y etanol) e incluso un azúcar (glicoaldehído). Los aminoácidos ricos en nitrógeno no brillan tan fácilmente en los enclaves nebulares, pero se infieren a partir de su presencia en condritas carbonáceas (meteoritos rocosos ricos en carbono), que se han encontrado en la Tierra. El fósforo, sorprendentemente raro en la Tierra, puede hallarse en grandes concentraciones en los meteoritos de hierro. Algunos sostienen que este componente clave para la vida nos llegó a través de bombardeos meteoríticos. El azufre procede del interior de la Tierra como parte de la constante actividad del manto superior. Además de la Tierra, el azufre constituye del 2 al 7 por ciento de los meteoritos rocosos y predomina en la química volcánica de Io, luna de Júpiter. Cabe la posibilidad de que otros procesos bioquímicos predominen en otras partes. Por ejemplo, alcohol, amonio y metano pueden permanecer líquidos a temperaturas mucho más bajas que el agua. Y, en principio, podrían servir de solventes, en los que elementos simples y moléculas pudieran reaccionar para formar nuevos tipos de moléculas complejas.

En cualquier caso, no hay pruebas sólidas de la existencia de vida fuera de los confines terrestres. La vida emergió en la Tierra hace unos 3800 millones de años, tras el cese del Bombardeo Pesado Tardío (cuyos cráteres de impacto y cuencas pueden observarse todavía en la Luna). Pero, si bien las circunstancias físicas de la vida sobre la Tierra están bastante bien definidas, los procesos químicos desarrollados en tierra firme, océano y atmósfera se hallan muy lejos de conocerse.

Tal como la conocemos, la vida reduce sus características determinantes a dos funciones esenciales: metabolismo y reproducción. (La movilidad resulta también un rasgo importante para la mayoría de las formas vivas.) El metabolismo implica la transferencia de materia y energía entre el ser vivo y el entorno. Entraña un conjunto de reacciones químicas que modifican las moléculas. La entidad metabolizadora por excelencia es la célula, dotada de una membrana permeable que encierra un amplio espectro de reactivos en su interior. En la Tierra, la reproducción corre a cargo de los ácidos nucleicos. La reproducción mediada por ADN constituye el motor del desarrollo y la evolución. El desarrollo se apoya en la replicación de la célula, mientras que la evolución implica un proceso de mutación y selección. Se habla de una protovida de ARN, molécula que puede cumplir la doble función de reproducción y metabolismo. Además del ADN y el ARN se han postulado otros ácidos nucleicos como moléculas alternativas portadoras de información.

Los meteoritos caídos en la Tierra aportan una fuente asequible para el estudio de la materia orgánica procedente del espacio. El meteorito Murchison que cayó en Australia en 1969 contiene granos de carburo de silicio que, a juzgar por sus relaciones isotópicas, fueron producidos por una supernova. El meteorito de Murchison pertenece a las condritas carbonáceas, meteoritos que se suponen formados a partir de fragmentos procedentes del cinturón de asteroides entre Júpiter y Marte. Se han identificado más de quinientos compuestos orgánicos en ese meteorito: hidrocarburos, alcoholes, ácidos carboxílicos, aminas, amidas, adenina, guanina y uracilo. De los setenta y cinco aminoácidos identificados en el meteorito, ocho son idénticos a los aminoácidos que encontramos en las proteínas. En cambio, aminoácidos ubicuos, como la histidina, no han aparecido entre los productos de la química cósmica.

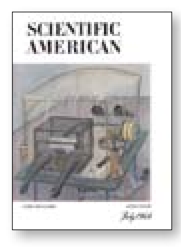
Entre las miríadas de rocas que continuamente bombardean la Tierra, muchas pudieron proceder de Marte. El origen marciano de esas rocas, incluida ALH84001, vino determinado por el análisis de la concentración relativa de determinados elementos químicos y sus isótopos, atrapados en el interior de las mismas. Ese meteorito se descubrió en 1984 en la región antártica de Allan Hills. El meteorito Mill, que explotó en 2012 sobre California, presenta moléculas orgánicas no encontradas en ningún otro meteorito.

Por su parte, el robot *Curiosity*, que tomó suelo en agosto de 2012, obtuvo indicios de que pudo haber habido vida en Marte. *Curiosity* evidenció que estaban allí todos los ingredientes esenciales para un entorno habitable: humedad prolongada, bloques esenciales de construcción de la vida y fuente de energía. En una primera cata, el robot tomó una muestra con compuestos orgánicos. No solo no había indicios de hostilidad contra la presencia de vida, sino que se identificaron ingredientes de una receta de la vida: carbono, hidrógeno, oxígeno, fósforo, nitrógeno y azufre. Y no menos importante, otros elementos combinados en compuestos que presentan diverso grado de oxidación. Los organismos pueden servirse de compuestos menos organizados para extraer energía en vez de recurrir a la luz solar para la fotosíntesis o consumir materia orgánica.

Si la vida bacteriana surgió tan prestamente en la Tierra, y si Marte llegó a alcanzar también condiciones favorables para la vida, cabría que se hubiera producido alguna forma de evolución en el manto bacteriano de Marte. En su nivel bacteriano, la vida es un fenómeno universal y puede esperarse donde y cuando se den las condiciones favorables. Con las misiones en curso a Marte y a Titán, y muchas más misiones proyectadas, la humanidad se encuentra en las puertas de un progreso excitante y ante posibles descubrimientos importantes en nuestra búsqueda de vida en el espacio.

—*Luis Alonso*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



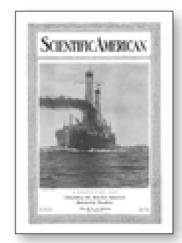
Julio 1964

Videófonos

«Este mes ya debería ser posible comunicarse desde Nueva York, Chicago o Washington con las otras dos ciudades mediante telefonía televisiva. Para ello, el usuario se servirá del videófono, aparato desarrollado por la American Telephone and Telegraph Company, que lo describe como "el primer sistema telefónico visual con dial que genera una imagen aceptable y se ha fabricado dentro de unos márgenes económicamente viables". Un modelo de sobremesa comprende una cámara y una pantalla de 4,5 pulgadas de ancho por 5,5 pulgadas de alto. Según la compañía, no cabe esperar que, por ahora, pueda dotarse de este servicio a hogares ni oficinas. Una de las razones es que la transmisión de imágenes requiere un ancho de banda de una capacidad equivalente a 125 teléfonos de solo voz.»

Chimpancés que construyen herramientas

«Jane Goodall, de la Universidad de Cambridge, describe en *Nature* sus observaciones, realizadas durante tres años en una reserva de Tanganica, sobre la construcción y empleo de herramientas por parte de chimpancés salvajes. La conducta que advirtió con mayor frecuencia fue la de despojar de sus hojas a ramitas de quince a treinta centímetros de largo mediante las manos o los labios. Esas ramitas las empleaban luego los animales a modo de sondas que empujaban por los orificios de los termiteros. Cuando las sacaban se comían los insectos que se habían agarrado a ellas. Era frecuente que los más jóvenes contemplaran lo que hacían los mayores para imitarlos. Concluye la investigadora que la población de chimpancés de la reserva transmite de una generación a la siguiente una serie de tradiciones culturales primitivas.»



Julio 1914

¿Cuán poderosa es la pluma?

«Este año tiene lugar una pacífica competición entre pueblos en pro de la civilización y el bien de la humanidad. La Exposición Internacional de Librería y Artes Gráficas en Leipzig podría muy propiamente calificarse de simposio de la educación humana. Se despliega allá, ante nuestros ojos, la historia de la cultura y la historia del hombre mismo. Se ofrece una valiosa información acerca de la evolución intelectual de los países; la ascensión desde las tinieblas, la superstición y la ignorancia hacia la luz y la alegría, la educación, el saber y el entendimiento.»

Secadora de manos eléctrica

«Agita al país el movimiento por la eliminación de la toalla común o de rodillo, al ser esta considerada una amenaza para la salud pública. A la toalla común le sucedió la de papel. Ahora el último grito de las innovaciones económicas y sanitarias es la "toalla de aire" usada en los lavabos públicos del Edificio del Distrito en Washington (D.C.). Se trata de una secadora de manos eléctrica, un invento de John M. Ward [patente n.º US1108285A], director del edificio. El aparato se compone de un ventilador que impulsa aire a través de un elemento calefactor hacia unos conductos y deflectores adecuadamente situados.»

Automóviles de artesanía

«Una empresa francesa de manufactura de automóviles construye las carrocerías mediante un novedoso procedimiento de enyesado; o acaso deberíamos decir de modelado, pues requiere una destreza mayor que la del estuquista común. El armazón del vehículo se hace de madera y sobre el mismo se clava un reticulado de alambre, tal como se muestra en la ilustración. El modelist a empieza entonces su labor con la paleta y el palustre, embadurnando la red de alambre con el material plástico. Una vez fraguado el revestimiento, puede desbastarse con un cepillo y lija, como si fuera madera. Se afirma que con este nuevo proceso se consiguen unas carrocerías muy livianas y duraderas.»



ARTESANÍA DEL AUTOMÓVIL: Trabajadores de una fábrica francesa aplicando yeso sobre una tela metálica en la construcción de las carrocerías, 1914.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXI, N.º 1, 4 DE JULIO DE 1914



Julio 1864

El trigo de las momias

«Según una creencia popular, el trigo hallado en los antiguos sepulcros de Egipto no solo germinaría tras el lapso de tres mil años, sino que produciría unas espigas de un tamaño y una belleza extraordinarios. Hay dudas sobre la cuestión; pero el informe de Antonio Figari-Bey, dirigido al Instituto Egipcio de Alejandría, parece contradecir esa idea. Uno de los tipos de trigo que Figari-Bey empleó en sus experimentos había sido hallado en el Alto Egipto, en el fondo de una tumba de Medinet Habu. La forma de los granos no había cambiado, pero el color, tanto por dentro como por fuera, se había tornado rojizo, como si hubieran estado expuestos a humo. Al noveno día de haberlos sembrado en tierra húmeda se habían descompuesto por completo, sin que pudiera descubrirse ni la menor traza de germinación.»

NEUROCIENCIA

Psicobiología de los hábitos

Ann M. Graybiel y Kyle S. Smith

Al descifrar los mecanismos neurales que subyacen a nuestros rituales diarios, los investigadores comienzan a comprender el modo en que adquirimos los hábitos y por qué nos cuesta tanto desterrarlos.





METEOROLOGÍA

Convocar a la lluvia

Dan Baum

Gobiernos y agricultores de todo el planeta invierten cada año millones de euros en el intento de controlar las condiciones meteorológicas. Los últimos avances científicos indican que su esfuerzo podría servir de algo.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

«Hemos caído en la tentación de vender descubrimientos»

Ernesto Lozano Tellechea

Entrevista con Álvaro de Rújula, investigador veterano del CERN, sobre la situación de la física de altas energías después del descubrimiento del bosón de Higgs.



ECONOMÍA

La economía Ponzi

Kaushik Basu

Muchas prácticas empresariales cotidianas guardan semejanza con timos infames.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Carlos Lorenzo: *Buscar fósiles mediante satélites*; Juan Manuel González Mañas: *Desactivar el cáncer*; Juan Pedro Adrados: *El futuro del diseño flexible*; Luis Bou: *Pensamientos electrificados*; Andrés Martínez: *Apuntes y Los nóbel y la fábrica del cuerpo*; Joandoménec Ros: *Mecanismos cerebrales de la visión*; Esteban Santiago: *Biología molecular de la olfacción*; José M. García de la Mora: *Bases biológicas del aprendizaje y de la individualidad*; Luis Cardona: *Preocupación por el coral*; Yago Ascasibar: *El primer resplandor de las estrellas*; Javier Grande: *Tras las huellas de la inflación*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España